



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National Polytechnique de Toulouse*

Discipline ou spécialité : *Agrosystèmes, écosystèmes et environnement*

Présentée et soutenue par *CLAVEL Lucie*
Le *15 Janvier 2010*

Titre : *Développement d'une méthode de construction et d'évaluation
de scénarios d'usages du sol de grands territoires*

Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste

JURY

LE BAIL Marianne, Professeure d'Université, AgroParisTech, Rapporteur
LE BER Florence, Ingénieure en chef IGERF, ENGEES, Rapporteur
BENOIT Marc, Directeur de recherche, INRA SAD, Rapporteur
JAMIN Jean-Yves, Chargé de recherche, CIRAD ES, Examineur
ALKAN-OLSSON Johanna, Chargée de recherche, Université de Lund, Suède, Examineur
MONTEIL Claude, Maître de conférence, INP/ENSAT, Examineur
LEENHARDT Delphine, Directrice de recherche, UMR AGIR INRA-ENSAT, Directrice de thèse

Ecole doctorale : *Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques, et Bioingénieries (SEVAB)*

Unité de recherche : *INRA, UMR 1248 AGIR, Equipe MAGE*

Directrice de Thèse : *LEENHARDT Delphine*



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National Polytechnique de Toulouse*

Discipline ou spécialité : *Agrosystèmes, écosystèmes et environnement*

Présentée et soutenue par *CLAVEL Lucie*
Le 15 Janvier 2010

Titre : *Développement d'une méthode de construction et d'évaluation
de scénarios d'usages du sol de grands territoires*

Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste

JURY

LE BAIL Marianne, Professeure d'Université, AgroParisTech, Rapporteur
LE BER Florence, Ingénieure en chef IGRF, ENGEES, Rapporteur
BENOIT Marc, Directeur de recherche, INRA SAD, Rapporteur
JAMIN Jean-Yves, Chargé de recherche, CIRAD ES, Examineur
ALKAN-OLSON Johanna, Chargée de recherche, Université de Lund, Suède, Examineur
MONTEIL Claude, Maître de conférence, INP/ENSAT, Examineur
LEENHARDT Delphine, Directrice de recherche, UMR AGIR INRA-ENSAT, Directrice de thèse

Ecole doctorale : *Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques, et Bioingénieries (SEVAB)*

Unité de recherche : *INRA, UMR 1248 AGIR, Equipe MAGE*

Directrice de Thèse : *LEENHARDT Delphine*

Remerciements

Non je n'ai pas effectué ce travail en soliste, comme me le faisait remarquer Marc Benoît dans son rapport, même si je me suis sentie bien seule parfois. Pourtant, je n'y serai jamais arrivée sans le concours de vous tous et d'autres, je pense là à l'épicier de la rue des trente-six ponts. Je remercie de tout mon cœur les membres de mon jury, qui ont eu l'inexplicable pouvoir de me faire enfin croire à ces 160 et quelques pages qui suivent, et qui même m'ont permis de les enrichir. Merci Marc, Marianne, Florence, Johanna, Jean-Yves et Claude pour cet intérêt que vous avez su démontrer à l'oral comme à l'écrit.

Si vous avez pu démontrer cet intérêt, c'est parce que j'ai été plus que bien entourée ces trois dernières années. Je voudrais à pour cela remercier mes collègues.

J'adresse d'abord mes sincères remerciements aux trois Mages. Delphine, directrice de thèse engagée, pour ton sang-froid, ta persévérance, mais aussi ta sensibilité et ta bienveillance. Rachelle (Puechberty), me t'avais décrite. Quelle a été ma surprise quand je t'ai vue arriver deux mois après le début de ma thèse dans notre couloir : je te croyais bien plus vieille ! Je n'ai jamais revu Rachelle (elle s'est mariée depuis). Par contre je t'ai découverte, et je mesure bien à quel point tu as été précieuse dans ce travail. Olivier, c'est pareil, très (trop ?) précieux dans ce travail : il y a des fois, je me demande si je ne t'ai pas piqué ta thèse, du moins la grille bibliographique qui en découle. Je me rassure en me disant que tu n'as toujours pas compris la différence entre exploratoire-forecasting et normatif-backcasting... puis me dé-rassure en me disant que moi non plus je n'ai pas compris (d'ailleurs Delphine non plus). Jacques-Eric, merci pour ta présence, plus distante, plus dure aussi, mais comment ne pas reconnaître la valeur ajoutée de ton recul ?

Je remercie aussi le bœuf et l'âne gris. Vu la masse de travail que vous avez abattue, je me demande si je n'aurai pas du vous remercier avant les trois Mages, la hiérarchie a fait la différence. Merci Denis, j'espère que notre collaboration te servira ainsi qu'à toute l'UMR : moi ça m'a enrichie. Marie-Hélène, je te dois encore un CD de Fela Kuti : merci pour ta spontanéité et ta convivialité. J'ai eu du plaisir à travailler avec vous deux et je suis heureuse de vous voir dans le même bureau.

Merci aussi au reste de l'équipe MAGE, Bruno (Colomb) et Daniel (Wallach), les vieux éléphants, Magali, Solenn, Jérôme et Marta, les jeunes singes.

Merci aux vieux docteurs : Pierre, Matthieu ; aux plus jeunes : Lolo, Clém, Martin, Célia ; et aux prochains : Soso, Jérôme, Anaïs, Pauline et Hélène (bon courage).

Merci au staff administratif sans qui : Françoise, Geneviève, Maryse, Marina et Chrystel.

Bien des collègues m'ont aidée à construire mon projet de thèse, mais pas seulement. Des personnes ont contribué à ce projet peut être sans le savoir. Je les remercie.

J'ai eu l'occasion d'interagir, durant ces trois années, avec une quantité de personnes qui m'ont permis de comprendre un territoire : depuis les enjeux de ce fameux débat de Charlas, à ceux d'un simple irrigant du système Neste ou d'un gestionnaire de l'eau dans le Sud-Ouest ; depuis la nature d'un sol à celle d'une variété de maïs, etc. Merci les experts et/ou acteurs de ma thèse : Martine Gaëckler, Jean Boussagnet, Christian Montgobert, Christian Longueval, Eric Justes, Philippe Debaeke, Luc Champolivier, Jean-Luc Trouvat, Laurent Rigou, Alain Villocel, Sara Fernandez, Françoise Carpi-Goulard, Laurent Verdier.

Je voudrais aussi souligner la qualité de mon comité de pilotage. Cet espace de discussion sérieux mais que vous avez su rendre convivial, voire chaleureux, m'a permis à chaque fois de me revigorer. Même si l'intensité des interactions avec chacun d'entre vous a été variable (distance, projets), je ne me serai gênée pour solliciter aucun d'entre vous pour un conseil quel qu'il soit. Merci donc Christine Aubry, Frédérique Angevin, Marie-Odile Cordier, Martine Gaëckler, Eric Justes et Robert Faivre.

Mon travail de thèse s'inscrivait dans le projet ADD Appeau. Ce projet a été pour moi une opportunité de me confronter à des regards extérieurs et constructifs. J'en remercie tous ses participants, notamment Arnaud Reynaud, toujours disponible au bout du fil.

J'ai eu aussi l'occasion de participer à différents événements (réunions, formations) lors de cette thèse. Ces événements m'ont offert la possibilité de présenter mon point de vue et de découvrir d'autres points de vue. Je tiens, dans cette page, à remercier les organisateurs et les participants de ces différents regroupements : Payotte, Ateliers pratiques recherches participatives, Réflexives®, communauté de pratique (Lisode), Biennale de la Chambre d'agriculture (Cahors, 2007), séminaires AFEID (Association Française pour l'Etude des Irrigations et du Drainage), assemblée générale AFEID, IEMSS 2008 (International Congress on Environmental Modelling and Software, Barcelone, 2008), WWW (World Water Congress, Montpellier, 2008), AgSAP (Integrated Assessment of Agriculture and Development, Egmond and See, 2009)

A présent je voudrais remercier les personnes qui n'ont pas participé à cette thèse directement, ils font partie de ma vie.

Je voudrais d'abord remercier Raphaële. Grâce à toi j'ai tenté d'explorer mon avenir. La science du futur (futurologie) est tellement incertaine que qui sait si je ne vendrai pas des yakissobâs sur la Paulista le mois prochain. J'ai apprécié de travailler avec toi.

Je voudrai faire une spéciale dédicace à Nans, la seule amie qui ait lu une page de cette thèse, et plus d'une vu qu'elle l'a lue de la page 1 à la page 166 en y faisant des commentaires d'une qualité remarquable (dixit Delphine, et moi évidemment).

[Espace de pub à Solenn, Jérôme et au reste de l'UMR : Anne se met à son compte, elle relit lettres de motivation, CV, articles en français et THESES, ce sera désormais un service payant.]

Il va de soit que je remercie ma famille. Mes parents d'abord. Vous m'avez offert (Noël 86 à Grabels, j'étais en CP), un énorme livre (30 x 30 cm, 2 kg), d'une centaine de pages écrites en tout petit (Les plus beaux comptes de Walt Disney, parti à Emmaüs sans consultation). Je l'ai lu en deux jours. Vous avez par conséquent, cru que je deviendrai écrivain. Je vous donne maintenant l'explication : je suis amoureuse de Peter Pan, d'où ce célibat prolongé... éternelle enfant que je suis. J'ai rédigé cette thèse pour me persuader du contraire (je suis adulte et sérieuse), ça n'a pas marché, je crois.

ManouPapi, vous comprendrez, en lisant cette thèse, que je ne me suis jamais rendue au trou du Toro. Mamie et Bon Pap, parce que vous vous avez compris que je n'y suis toujours pas allée. Mes sœurs, vous avez cru bon d'éviter de me donner des bonnes nouvelles pendant ma rédaction (bizarre non ?). Mon frère, si tu ne lis pas La Stratégie Ender, je te somme de lire cette thèse. Mes quatorze oncles et tantes, vous comprendrez que je ne personnalise pas mes remerciements, je ferai des jaloux. Mes vingt-six cousins, leurs conjoints et enfants, c'est pareil, vous êtes trop (trop sympas). Je tenais juste à dire à Olive qu'avec Chloé on se préfère. Merci les collocs : Selmax, Elsaté, Cairoll, Nico.

Obrigada galera da capoeira : Boca, Carneiro, Manga, Gentleman, Surfista, Ratinha. Joao, por seu jeito de ser. Januy, também.

Merci les copainings. Marie Mad Mouloud et sa fille Marie Mad loulou, pour vous. Rominus pour avoir laissé ta femme lire ma thèse de la page 1 à la page 166 et pour toi aussi. Guillaume et Lise : coup de cœur 2007.

Et merci à ceux qu'on remercie en dernier mais qui seront toujours là : Kamou, GG, Agnès, Audette, Florian Pech, Ludo, Aurel, Sab, Didi, Adriano, Martine.

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIERES.....	7
ABREVIATIONS	10
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX.....	12
L'ENCADRE.....	12
INTRODUCTION GENERALE	13
La gestion spatiale de l'eau dans les territoires agricoles	14
Des scénarios d'usages du sol pour planifier la gestion « spatiale » de l'eau	16
L'exemple du barrage de Charlas	17
Historique du débat	17
Un support à ma problématique de thèse.....	18
Présentation du mémoire.....	19
CHAPITRE I. LES SCENARIOS D'USAGES DU SOL	21
I.1. Des scénarios pour la planification territoriale.....	22
I.1.1. L'émergence d'une discipline liée à la planification.....	22
I.1.2. Le scénario en tant qu'objet	23
I.1.2.1. Eléments clefs des scénarios.....	23
I.1.2.2. Typologies de scénarios.....	25
I.1.3. L'approche scénario	27
I.1.3.1. Approche, démarche et méthode	28
I.1.3.2. Critères de classification des méthodes	29
I.1.3.3. Typologies d'approches scénarios	32
I.2. Des scénarios d'usages du sol pour la gestion conjointe des territoires et des ressources naturelles	34
I.2.1. Les éléments clefs des scénarios d'usages du sol.....	34
I.2.1.1. Situation initiale.....	35
I.2.1.2. Forces de changement	36
I.2.1.3. Evolution du système	37
I.2.1.4. Situation finale	38
I.2.1.5. Impacts	38
I.2.2. Les facteurs de localisation, une notion spécifique des scénarios d'usages du sol	39
I.2.3. Les méthodes pour caractériser les éléments des scénarios d'usages du sol en milieu agricole.....	40

I.2.3.1.	Etat initial du système	40
I.2.3.2.	Forces de changement, évolution et état final du système	42
I.2.4.	Impacts	45
CHAPITRE II. FORMULATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE		48
CHAPITRE III. MATERIEL		53
III.1.	Le système Neste	54
III.1.1.	Le territoire	55
III.1.1.1.	Climat	55
III.1.1.2.	Sols	56
III.1.1.3.	Activités agricoles	57
III.1.2.	Le réseau hydrographique	60
III.1.2.1.	Historique	60
III.1.2.2.	Usages	60
III.2.	Un modèle bio-décisionnel spatialisé	61
III.2.1.	Le modèle biophysique	62
III.2.2.	Le modèle décisionnel	62
III.2.3.	Paramètres	63
III.2.4.	Spatialisation	64
CHAPITRE IV. RESULTATS ET APPLICATIONS		65
IV.1.	Caractérisation de la situation de référence	66
IV.1.1.	Résumé en français	66
IV.1.2.	Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems	68
IV.1.2.1.	Abstract	68
IV.1.2.2.	Introduction	69
IV.1.2.3.	Material and methods	71
IV.1.2.4.	Results	77
IV.1.2.5.	Discussion	81
IV.1.2.6.	Conclusion and prospects	85
IV.1.2.7.	Acknowledgments	85
IV.2.	Un outil pour construire et évaluer des distributions de systèmes de culture	86
IV.2.1.	Résumé en français	86
IV.2.2.	SPACSS: A tool for translating qualitative scenarios of cropping system distribution into maps of cropping systems	88
IV.2.2.1.	Abstract	88
IV.2.2.2.	Introduction	88
IV.2.2.3.	Material and methods	91
IV.2.2.4.	Application and discussion	99
IV.2.2.5.	Conclusion	106
IV.2.2.6.	Acknowledgments	107
IV.3.	Applications	108
IV.3.1.	Introduction	108
IV.3.2.	Application 1 : Impact du choix de précocité du maïs semé sur la demande en eau d'irrigation	109
IV.3.2.1.	Objectifs et hypothèses	109
IV.3.2.2.	Scénarios	109
IV.3.2.3.	Evaluation	109
IV.3.2.4.	Discussion	115
IV.3.3.	Application 2 : Combiner choix de précocité et date de semis	115
IV.3.3.1.	Objectifs et hypothèses	116
IV.3.3.2.	Scénarios	116
IV.3.3.3.	Evaluation	118

IV.3.3.4.	Discussion	121
IV.3.4.	Application 3 : Vers une substitution du maïs irrigué par une rotation blé dur / tournesol valorisée par des apports d'eau.....	122
IV.3.4.1.	Objectif et hypothèses	122
IV.3.4.2.	Scénario	123
IV.3.4.3.	Evaluation.....	123
IV.3.4.4.	Discussion	127
IV.3.5.	Conclusion.....	127
CHAPITRE V.	DISCUSSION GENERALE	129
V.1.	Retour sur les choix faits pour développer SPACSS	130
V.1.1.	Les indicateurs d'évaluation.....	130
V.1.2.	Spatialiser un modèle bio-décisionnel.....	131
V.1.2.1.	Utiliser un modèle de culture dynamique.....	131
V.1.2.2.	Evaluation à l'échelle de la parcelle	132
V.1.2.3.	Evaluation à l'échelle du territoire	133
V.1.2.4.	Conclusion.....	134
V.1.3.	Caractérisation de la situation de référence.....	135
V.1.3.1.	Représentation du système	135
V.1.3.2.	Définition des unités de support et de simulation dans mon travail	136
V.1.3.3.	Conclusion.....	139
V.2.	Contribution à la construction et l'évaluation des scénarios d'usages du sol.....	140
V.2.1.	Un outil permettant de quantifier un discours narratif.....	140
V.2.1.1.	Un outil qui contraint à quantifier un discours	140
V.2.1.2.	Le problème de conversion.....	141
V.2.1.3.	Conclusion.....	142
V.2.2.	Utilisation de cet outil dans une approche scénario	143
V.2.2.1.	Situation de référence	144
V.2.2.2.	Construction et évaluation de scénarios	145
V.3.	Perspectives d'utilisation de l'outil.....	147
BIBLIOGRAPHIE	149	
ANNEXES	160	
RESUME	198	

Abréviations

°C.j	-	degré jour
ACOR	-	Alternatives à la Création de nOveaux Réservoirs
ADD	-	Agriculture et Développement Durable
AFEID	-	Association Française pour l'Etude des Irrigations et du Drainage
CACG	-	Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
GIEC	-	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ha	-	hectare
km	-	kilomètre
km ²	-	kilomètre carré
m ³ /s	-	Mètre cube par seconde
mm	-	millimètre
Mm ³	-	million de mètres cubes
MOuSTICS	-	MODERATO union STICS
OTEX	-	Orientation technico-économique
PAC	-	Politique Agricole Commune
PRA	-	Petite région Agricole
RPG	-	Registre Parcellaire Graphique
SAU	-	Surface Agricole Utile
SI	-	Surface Irrigué
SIG	-	Système d'Information Géographique
SPACSS	-	SPAtial Cropping System Scenario builder and evaluator
STICS	-	Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Culture Standard
UDS	-	unité de support
Ugest	-	Unité de Gestion de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne

Liste des figures

Figure 1 : Les éléments clefs des scénarios.....	24
Figure 2 : Classification de 25 scénarios d'usages du sol provenant de 6 approches différentes en fonction des forces de changement prises en compte dans les scénarios du GIEC (Bush, 2006).....	37
Figure 3 : Combinaisons de méthodes pour décrire les forces de changement, l'évolution du système et l'état final du système dans les scénarios d'usages du sol	44
Figure 4 : Différents modes de comparaison des indicateurs produits pour évaluer les scénarios	47
Figure 5: Combinaisons de méthodes pour décrire l'état final du système et les impacts dans les scénarios d'usages du sol.....	50
Figure 6 : Le système Neste	54
Figure 7 : Cumuls moyens annuel des précipitations en Midi-Pyrénées – période 1971/2000 (d'après Météo France).....	55
Figure 8 : Précipitations et évapotranspirations moyennes cumulées mensuellement dans la ville d'Auch (1998-2008)	56
Figure 9 : Les grands ensembles morpho-pédologiques du système Neste (CRAMP, 1993)	57
Figure 10 : Variabilité de la SAU des exploitations du type GCpS (Grandes Cultures/ petite taille/ Sec) au sein du système Neste (Soudais, 2008).....	60
Figure 11: The Neste System.....	71
Figure 12: Average monthly precipitation and evapotranspiration in Auch (43°39'0" N, 0°35'0"E).....	72
Figure 13: Farm types distribution within Small Agricultural regions and main soils	78
Figure 14: The followed methodology	81
Figure 15: The Neste System (from Clavel et al., 2009, in review).....	94
Figure 16: SPACSS general framework.....	96
Figure 17: Division into support units of the Neste system. Support unit 10 (SU10) belongs to management unit 7 and to Astarac small agricultural region	97
Figure 18: The GUI-IN	98
Figure 19: Spatial distribution, for each water management unit, of the reduction in irrigation demand resulting from scenarios 1 and 2 for the year 2000.....	101
Figure 20: Distribution over time, by 10-day periods, of irrigation demand at the Neste system level resulting from the reference situation, scenario 1 and scenario 2 for the year 2000	102
Figure 21 : Demande en eau estimée pour les scénarios T, 1/2 T, 1/2 P et P sur le système Neste (années 2000 et 2003).....	110
Figure 22 : Répartition par décade de la demande en eau du maïs irrigué sur le système Neste (scénarios de référence T ; ½ T ; ½ P et P ; années 2000 et 2003).	111
Figure 23 : Cumul des températures et des précipitations à la datation d'Auch les années 2000 et 2003. 112	
Figure 24 : Evaluation des scénarios de l'application 1 par UDS	113
Figure 25 : Hypothèses et description quantitative des scénarios.....	117
Figure 26 : Demande en eau du maïs irrigué sur le système Neste pour les scénarios REF, PRECO et SEMIS.....	118
Figure 27 : Evaluation et description des scénarios REF, PRECO et SEMIS par Ugest.....	119
Figure 28 : Prélèvements d'irrigation cumulés par décade dans les Ugest 6, 7 et 8 pour les scénarios REF et PRECO	120
Figure 29 : Prélèvements d'irrigation cumulés par décade dans les Ugest 1, 15 et 16 pour les scénarios REF et PRECO	121
Figure 30 : Distribution de la demande en eau d'irrigation cumulée par décades, de la situation de référence (REF), du scénario BT, du tournesol irrigué dans le scénario BT et du blé dur irrigué dans le scénario BT.....	124
Figure 31 : Comparaison du scénario BT à la situation de référence (REF) par Ugest.....	126
Figure 32 : Combinaisons de méthodes pour construire la distribution initiale des systèmes de culture .	145
Figure 33 : inscription des applications proposées dans des approches scénario	147
Figure 34 : La couverture des différentes cartes disponibles	169
Figure 35 : Guide des sols de Midi Pyrénées.....	172
Figure 36 : La carte des sols du projet ADEAUPI	174

Figure 37 : Pédopaysages du Gers	175
Figure 38 : Données requises dans MO _u STICS	179
Figure 39 : UDS estimées homogènes pour la distribution des sols	183

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de variantes autour de la définition des éléments clefs des scénarios.....	25
Tableau 2 : Possibilités de classification des scénarios en tant qu'objet.....	25
Tableau 3 : Classification des méthodes selon la nature des participants et la nature du scénario produit	30
Tableau 4 : Classification des méthodes selon le mode de production de l'information et la nature de l'information produite.....	31
Tableau 5 : Les 10 types d'exploitation résultant des critères choisis pour classer les exploitations recensées dans le RGA (Soudais, 2008).....	59
Tableau 6 : Unités cartographiques pédogéologiques (CRAMP)	171
Tableau 7 : Caractéristiques associées aux différentes Unités Cartographiques de Sols dans le projet ADEAUI.....	173
Tableau 8 : Correspondance entre les différentes unités présentées sur les cartes	176
Tableau 9 : Caractéristiques associées aux différents sols dans SPACSS	178
Tableau 10 : Difficultés et solutions associées à la caractérisation des différents sols pour SPACSS	182

L'encadré

Encadré 1 : Le glossaire de Bishop et al. (2007)	28
--	----

INTRODUCTION GENERALE

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ADD APPEAU : « Quels agrosystèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable de la ressource en eau ? Outils et méthodes pour une gouvernance territoriale ». Ce projet se positionne dans le cadre de la gestion « spatiale » de l'eau définie par Narcy et Mermet (2003). Son objectif spécifique est de développer des outils et des méthodes comportant des modèles mathématiques pour évaluer des scénarios destinés à guider la planification conjointe des activités agricoles et des ressources en eau. Dans cette thèse, je m'intéresse à ces outils et méthodes, dans la mesure où ils permettent de construire des scénarios d'usages du sol et de les évaluer quantitativement grâce à des modèles calculatoires. Je précise donc, dans cette introduction, la notion de gestion « spatiale » de l'eau. J'explique ensuite en quoi les scénarios d'usages du sol peuvent faciliter la planification de cette gestion spatiale de l'eau. Ensuite, j'utilise l'exemple de la construction d'un barrage et des polémiques que ce barrage a pu susciter pour introduire le plan de ce mémoire.

La gestion spatiale de l'eau dans les territoires agricoles

La gestion « spatiale » de l'eau, communément appelée gestion territoriale de l'eau, consiste à orienter les modes d'occupation du sol pour une meilleure gestion de l'eau (Feuillette, 2004). Elle permet d'intervenir sur l'usage du sol des espaces d'où proviennent les flux d'eau et de pollution, par exemple pour créer des zones tampon ou pour restreindre les usages du sol en zone inondable. Mermet et Treyer (2001), Narcy et Mermet (2003) et Narcy (2004) montrent en effet que la traditionnelle gestion en termes de « flux » de la ressource en eau pour la construction et maintenance de retenues, de transferts d'eau de stations de traitement et d'épuration, de réseaux par exemple) présente des limites. Le besoin de gestion conjointe du territoire et des ressources naturelles, mis en évidence sur l'exemple de la ressource en eau, concerne aussi d'autres ressources comme la forêt, les habitats et la biodiversité, du fait de leur capacité à réguler le climat, le stockage de carbone et même l'augmentation de maladies comme le paludisme (Foley et al., 2005).

La gestion territoriale apparaît donc nécessaire pour gérer les ressources naturelles. Elle est d'ailleurs de plus en plus imposée par le contexte réglementaire. Depuis les années 90, les lois environnementales identifient des espaces écologiques pertinents pour la gestion des ressources naturelles (Martin et al., 2006). La loi sur l'eau de 1992¹ et la directive cadre sur l'eau² ont par exemple identifié le bassin versant comme l'espace, ou territoire, pertinent pour la gestion de l'eau et elles imposent à chaque bassin de se doter d'un comité de bassin. Constitué par différents porteurs d'enjeux, ce comité de bassin représente un espace privilégié de concertation. Il est le lieu d'élaboration des Schémas Directeurs d'Assainissement et de Gestion des Eaux (SDAGE) : « instruments de planification qui fixent les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dans l'intérêt général et dans le respect des principes de la loi sur l'eau, des objectifs environnementaux, les modalités de récupération des coûts liés aux usages de l'eau, les aménagements nécessaires pour satisfaire ces objectifs, ainsi que les sous-bassins hydrographiques pour lesquels un Schéma d'Assainissement et de Gestion des Eaux (SAGE) devra être réalisé »³.

¹ Loi n°92-3 du 3 janvier 1992, sur l'eau

² Directive 2000/60/EC

³ www.eaufrance.fr

Les territoires agricoles présentent des spécificités dont la gestion spatiale de l'eau doit tenir compte. En zone agricole, les flux d'eau de matière, comme les nitrates ou les pesticides émis par une parcelle, sont largement conditionnés par la nature des cultures et des techniques associées à cette parcelle. Par exemple, la pratique du labour a un impact sur l'érodibilité d'une parcelle. Ces flux sont aussi conditionnés par la position qu'occupe la parcelle dans le territoire. L'érosion résultant de la pratique du labour sur une parcelle entourée de haies est inférieure à l'érosion résultant de la pratique du labour sur la même parcelle qui ne serait pas entourée de haies. Pour pouvoir évaluer l'impact de l'usage du sol dans les territoires agricoles, il faut donc pouvoir associer à chaque parcelle du territoire étudié une activité agricole définie par un couvert végétal et des pratiques, autrement dit un système de culture. Le système de culture est défini par la nature des cultures, leur ordre de succession et les itinéraires techniques associés à chaque culture, pour un ensemble de parcelles cultivées de manière homogène (Sebillotte, 1990).

Pour évaluer l'impact environnemental de l'usage du sol dans les territoires agricoles, il faut caractériser la distribution spatiale des systèmes de culture de ce territoire (Leenhardt et al., 2009). Une distribution donnée résulte de la conjonction de différents facteurs appelés déterminants des systèmes de culture. Les déterminants du choix d'un système de culture en un lieu donné s'expriment à plusieurs échelles (exploitation, territoire) (Jouve, 2007) et sont de différentes natures (biophysiques, économiques, techniques ou sociaux). Ainsi le fait qu'on observe un système de culture particulier sur une parcelle donnée s'explique par la localisation de cette parcelle dans un type d'exploitation particulier. Par exemple, Maton et al. (2007) montrent que le choix de précocité est lié aux caractéristiques de l'exploitation comme l'orientation technico économique (OTEX) ou la part de la surface irriguée dans la surface agricole utile. L'observation d'un système de culture sur une parcelle peut aussi s'expliquer à l'échelle du territoire par des facteurs biophysiques comme le sol, la pente ou le climat ; des facteurs économiques comme la subvention à la culture du soja en Haute-Garonne ou proximité d'une coopérative ; des facteurs techniques comme la présence d'un barrage ou encore des facteurs sociaux comme les traditions.

Des scénarios d'usages du sol pour planifier la gestion « spatiale » de l'eau

La gestion territoriale de l'eau ou d'une autre ressource comporte une dimension temporelle. Elle doit donc être planifiée. Trouvat (1997) inclut le terme planification à la définition de la gestion de l'eau. Coyette (2004) définit la gestion territoriale des ressources comme l'ensemble des méthodes et processus mis en place et utilisés par des groupes d'utilisateurs à l'échelle de territoires définis et acceptés par ceux-ci en vue de planifier et organiser l'usage durable et reproductible des ressources de ces territoires. D'après l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO, 1993), la planification territoriale (*land-use planning*) consiste en « une évaluation ex-ante systématique des impacts des alternatives possibles d'usages du sol et des conditions socio-économiques (infrastructure, démographie, pauvreté etc.) d'un territoire sur les ressources naturelles (eau, sol, écosystèmes etc.) ». Elle doit donc tenir compte des incertitudes comme le climat ou les prix qui peuvent influencer ces alternatives possibles. L'objectif de cette planification est de proposer une allocation des usages du sol et des infrastructures socio-économiques dans le territoire qui satisfasse les besoins des acteurs concernés tout en préservant les ressources naturelles. De plus en plus de spécialistes, comme Höppner (2009) ou Tress et Tress (2003) soulignent aussi la nécessité d'impliquer les acteurs directs comme les habitants et indirects comme l'Etat dans la planification territoriale. Amler et al. (1999), définissent la planification territoriale comme un processus de dialogue itératif entre les différents acteurs d'un territoire. Ainsi, la planification territoriale peut se définir comme un processus d'échange itératif entre les acteurs d'un territoire permettant de projeter dans le futur des alternatives possibles des usages du sol et des infrastructures socio-économiques afin d'en évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux. L'objectif finalisé de la planification territoriale est de décider quelle alternative implémenter et comment l'implémenter.

La construction et l'évaluation de scénarios d'usages du sol permettent de proposer des alternatives aux usages actuels du sol puis de les évaluer au regard de divers critères afin de faciliter le choix de l'une d'elles. Ces constructions et évaluation de scénarios d'usages du sol permettent (1) de prendre en compte le risque et les incertitudes liées à la réalisation de ces alternatives dans le contexte particulier du territoire d'étude ; (2) d'éclairer les décideurs sur les impacts potentiels de politiques ou stratégies de gestion (Greeuw et al., 2000 ; Dockerty et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006 ; Mahmoud et al., 2009) ; et (3) d'impliquer les acteurs dans l'identification des enjeux existant dans un territoire donné, dans la détermination

d'alternatives de développement et d'aménagement de ce territoire ou dans l'évaluation de ces alternatives (Alcamo, 2001 ; Alcamo, 2008). Les gestionnaires des territoires peuvent pour ce dernier point soit présenter aux acteurs des scénarios déjà construits comme le font Palang et al. (2000), soit les impliquer dans l'ensemble du processus de construction et d'évaluation du scénario comme le font Etienne et al. (2003). Le projet Eururalis utilise les deux approches (Westhoek et al., 2006 ; Van Meijl et al., 2006). Les scénarios apparaissent ainsi comme des outils appropriés pour réaliser un processus de planification de la gestion spatiale de l'eau.

L'exemple du barrage de Charlas

Le projet de construire un barrage sur la commune de Charlas (Haute-Garonne) pour soutenir les débits d'étiage de la Garonne constitue un exemple illustrant nécessaire gestion conjointe des usages du sol et des ressources naturelles. Un débat public organisé en 2003 pour discuter de l'opportunité de construire ce barrage s'est rapidement transformé en une polémique autour des usages agricoles du sol. C'est cet exemple du barrage de Charlas que je mobilise dans ma thèse pour définir ma problématique de recherche (CHAPITRE II) et construire mon projet de thèse.

Historique du débat

L'histoire du barrage de Charlas commence en 1988. Après plusieurs années de sécheresse, le Programme de Développement des Ressources en Eau de la Garonne identifie la nécessité de créer de nouvelles ressources en eau afin de soutenir les débits d'étiage de la Garonne. En 1996, le comité du bassin Adour Garonne se déclare favorable au projet d'implémenter une retenue de 110 Mm³ dans la commune de Charlas. Cette retenue permettrait non seulement de soutenir les débits d'étiages de la Garonne (75 Mm³ seraient affectés à cet usage) mais aussi d'augmenter l'irrigation dans le système Neste (23 Mm³ réservés à l'irrigation dans le système Neste). En 1997, l'association France Nature Environnement demande l'ouverture d'un débat public sur l'opportunité de construire ou non cette retenue. Ce débat public est ouvert en 2003. Les opposants au projet, réunis au sein du projet ACOR (Alternatives à la Création de nOuveaux Réservoirs) pointent du doigt le maïs irrigué (Mandement, 2004). Ils argumentent qu'au lieu d'augmenter l'offre en eau il faudrait réduire la demande et proposent le financement du passage de 25 000 ha irrigués en sec. Le calcul qu'ils proposent est assez

simple : un hectare de maïs consomme en moyenne 2 000 m³ par an. Le passage en Midi Pyrénées de 25 000 ha de maïs irrigué en sec permettrait d'économiser 50 Mm³ d'eau, qui permettraient de soutenir les étiages de la Garonne (Pointereau, 2003 ; Uminate, 2007).

Seulement, la demande en eau du maïs irrigué est variable selon les agriculteurs, les sols et les années. Pour réaliser ce passage, il faudrait non seulement savoir identifier où le maïs va être remplacé, et par quel autre système de culture il va l'être.

Un support à ma problématique de thèse

De prime abord, la solution proposée par le projet ACOR apparaît comme raisonnable du point de vue de l'estimation des économies d'eau, il est assez communément admis qu'un hectare de maïs irrigué en broubène ou alluvion consomme entre 1700 et 2500 m³. La CACG considère une demande entre 1700 m³/ha en année moyenne pour un écart-type 500 m³/ha (Hurand, 2000), elle ne compte là que les apports d'irrigation. Les instituts techniques considèrent la demande totale de la culture, ils l'estiment entre 2000 et 2700 m³/ha (Deumier et al., 2006). C'est donc dans ces sols-là que l'on rencontre les plus grands périmètres irrigués. En revanche, les apports d'eau sur le maïs sont plus limités dans les terreforts (CA32, 2008). La suppression de 25000 ha de maïs irrigué en terreforts aura donc un impact plus limité sur les économies d'eau que si elle a lieu sur des broubènes.

De plus, la solution proposée par le projet ACOR ne propose pas d'alternative à la culture du maïs. La réalisation de cette suppression dans des exploitations ayant massivement investi dans du matériel d'irrigation semble impossible, ou alors en remplaçant le maïs irrigué par une autre culture irriguée, moins gourmande en eau. Le constat est le même, cette substitution ne conduirait pas à des économies d'eau s'élevant à 50 Mm³. La suppression de 25000 ha de maïs irrigué nécessite de préciser (1) l'endroit où sera réalisée la suppression du maïs irrigué et (2) le système de culture pour remplacer ce maïs irrigué.

Ce débat mobilise des indicateurs quantitatifs (la consommation d'eau d'un ha de maïs irrigué, l'économie de la demande en eau à l'échelle de Midi-Pyrénées) pour juger de propositions de distributions alternatives de systèmes de culture. Il existe des outils pour estimer ces indicateurs à l'échelle de la parcelle (Bergez et al., 2001) ou à l'échelle du territoire (Leenhardt et al., 2004, a et b). Seulement les propositions sont faites de manières narrative et peu précise. Pour alimenter ce débat, un nouvel outil semble nécessaire. Son rôle serait de permettre aux porteurs d'enjeux de décrire, de manière narrative, une distribution

alternative des usages du sol (un scénario portant sur la distribution des systèmes de culture) afin d'en évaluer quantitativement la demande en eau d'irrigation.

Cet outil permettrait d'une part aux acteurs de préciser leur discours : où enlève-t-on le maïs irrigué ? Par quel système de culture le remplace-t-on ? D'autre part, il permettrait par une évaluation quantitative de la réduction de la demande en eau d'irrigation d'acquérir une connaissance de l'impact des pratiques d'irrigation sur la demande en eau du territoire : quels sont les facteurs conduisant à de plus grandes économies d'eau à l'échelle du territoire ? Quels sont les facteurs sur lesquels il est impossible de jouer ? etc.

Présentation du mémoire

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres.

Dans le premier, je propose d'abord une revue bibliographique portant sur la construction et l'évaluation de scénarios. Cette revue me conduit à identifier cinq éléments clefs à développer dans un et les méthodes pour les caractériser dans le cas spécifique des scénarios d'usages du sol pour la gestion des ressources naturelles. Ce qui me conduit à identifier une question de recherche méthodologique : « Comment dans une approche scénario permettre de décrire de manière narrative une distribution de système de culture pouvant être évaluée à l'aide de modèles de calcul numérique ? ».

Dans un deuxième chapitre, j'introduis ma question de recherche en expliquant en quoi les exemples de scénarios d'usages du sol étudiés dans le CHAPITRE I ne permettent pas de répondre aux questions soulevées lors du débat de Charlas.

Dans le troisième chapitre, je présente le matériel que j'ai utilisé pour répondre à cette question. Je présente le territoire choisi pour répondre à cette question : le système Neste, un bassin versant du sud ouest de la France, où la culture du maïs irrigué a longtemps été stigmatisé dans des débats portant sur la gestion quantitative de la ressource en eau. Je présente aussi un modèle de calcul numérique MO_uSTICS que je vais spatialiser pour évaluer les scénarios construits de manière narrative. Ce modèle a été développé par l'équipe de recherche MAGE, au sein de laquelle j'ai réalisé cette thèse, afin de représenter les décisions des agriculteurs quant à l'irrigation d'un certain nombre de cultures.

Dans le quatrième chapitre, je présente mes résultats. Je présente d'abord mes deux résultats méthodologiques sous la forme d'articles. Le premier résultat est l'élaboration d'une procédure d'allocation spatiale des systèmes de culture pour construire une situation de référence. L'originalité de cette procédure réside dans l'implication d'un expert pour la description des déterminants (facteur de localisation) des systèmes de culture. Cette procédure permet de combler le manque de données observées pour construire la situation de référence en combinant : données existantes, expertise et modèle statistique. Le deuxième résultat que je présente est l'élaboration d'un outil permettant à un utilisateur de modifier la distribution des systèmes de culture proposée précédemment pour l'évaluer, quantitativement, à l'aide d'un modèle calculatoire. Finalement je présente des applications de cet outil pour traiter des scénarios qui répondraient à différents questionnements aux vues de la revue bibliographique effectuée précédemment.

La cinquième partie est une discussion générale. Dans cette discussion je reviens d'abord sur les choix que j'ai faits pour construire l'outil que je propose, ensuite je montre dans quelle mesure cet outil me permet de répondre à ma question de recherche.

CHAPITRE I. LES SCENARIOS D'USAGES DU SOL

Si les scénarios d'usages du sol facilitent la gestion conjointe des ressources naturelles et des territoires, il convient d'abord de préciser le terme « scénario ». Ensuite, il est nécessaire de préciser ce qu'est un scénario d'usages du sol et comment un scénario est construit dans le cadre de la planification des territoires.

Dans la première section de ce chapitre (section I.1), je propose une revue de travaux bibliographiques portant sur les scénarios. Cette revue me permet de développer une grille d'analyse des scénarios, que j'utilise pour comparer des scénarios d'usages du sol. Je présente cette analyse des scénarios d'usages du sol dans la deuxième section de ce chapitre (section I.2).

1.1. Des scénarios pour la planification territoriale

1.1.1. L'émergence d'une discipline liée à la planification

L'utilisation d'une démarche scientifique pour caractériser les futurs possibles d'un système est traditionnellement liée à un souci de planification. Cette démarche émerge dans les années 50 pour satisfaire, dans un premier temps, des besoins de planification militaire, industrielle ou commerciale (Van Notten et al., 2003 ; Simon et al., 2006). Cette démarche s'est adaptée à l'évolution des besoins de planification (politiques, économiques, sociaux et environnementaux). Il existe aujourd'hui une telle diversité de travaux se réclamant de l'approche scénario qu'un certain nombre d'auteurs a cherché à en établir des typologies (Greeuw et al., 2000 ; Van, Notten et al., 2003, Börjeson et al., 2006 ; Simon et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006 ; Bishop et al. (2007), Alcamo (2008) ou Popper (2008)). D'autres ont travaillé à proposer des cadres conceptuels pour structurer la démarche de construction de scénarios (Mahmoud et al., 2009). L'objectif général de ces travaux est de servir de guide pour des travaux postérieurs (Van Notten et al., 2003 ; Börjeson et al., 2006).

Il est difficile d'identifier une typologie ou de construire un cadre conceptuel qui seraient commun à tous les travaux destinés à produire des scénarios. La première difficulté réside dans l'utilisation d'un terme pour désigner l'objet produit par la démarche et la démarche elle-même. Lorsque les auteurs désignent l'objet ils utilisent le mot scénario (Godet, 1991 ; Alcamo, 2001 ; Van Notten et al., 2003 ; Bishop et al., 2007 ; Alcamo, 2008 ; Agence Européenne de l'Environnement, 2009; Mahmoud et al., 2009), à quelques exceptions près où certains parlent de prévision (Börjeson et al., 2006). C'est lorsqu'ils désignent la démarche que la terminologie est plus confuse. Certains parlent de technique des scénarios (Bishop et al., 2007), d'autres de méthode des scénarios (Godet, 1991), de prospective (Godet, 1991), de construction de scénarios (scenario development) (Bishop et al., 2007 ; Alcamo, 2008). Certains même utilisent le mot scénario pour désigner l'objet et/ou la démarche (Hulme et Dessai, 2008). Marien (2002) fait état de cette confusion en dressant une liste des termes rencontrés pour désigner les démarches permettant de penser le futur.

Si la terminologie est confuse, l'acception d'une définition commune semble difficile. Comme l'écrivent Janssen et al. (2009), les discussions entre chercheurs de différentes disciplines et acteurs porteurs de différents enjeux ont de grandes chances d'entraîner (1) le

développement d'un terme « conteneur » (*container*), qui servirait de « formule magique » (*magical solution*), ou (2) des discussions sur la définition du terme scénario sans conclusions acceptables pour l'ensemble des participants. Des travaux ont cependant tenté de caractériser les scénarios en tant qu'objet et en tant que démarche.

Dans la suite de ce chapitre je présenterai ces travaux d'abord en introduisant la notion de scénario en tant qu'objet, puis en présentant l'approche, qui recourt à une ou plusieurs méthodes, pour construire et évaluer des scénarios.

I.1.2. Le scénario en tant qu'objet

Le scénario peut être caractérisé comme un objet qui caractérise les futurs possibles d'un système étudié. Le système comme le définissent Checkland (1994) ou Le Moigne (1999) est une représentation d'une partie de la réalité dont il convient de définir différents composants : ses limites, ses sous-systèmes, les éléments externes au système et les relations en œuvre entre ces différents éléments. Une fois le système étudié, la caractérisation d'un scénario portant sur les évolutions possibles de ce système repose sur la caractérisation de différents éléments clefs, dont le nombre et la nature sont sujets à discussion. Après avoir présenté ces éléments clefs, je présenterai les différentes typologies établies pour classer les scénarios.

I.1.2.1. Éléments clefs des scénarios

Certains auteurs, comme Van Notten et al. (2003) ou Börjeson et al. (2006), distinguent les scénarios simples (où seule est décrite la situation finale – *snapshot scenarios*) des scénarios complexes (où la trajectoire du système est décrite – *chain scenarios*). Ils considèrent donc la simple description de l'état final du système comme un scénario à part entière, alors que Rotmans et al. (2000) ou Alcamo (2008) considèrent cela comme une vision et non un scénario. Le fait qu'une simple image du futur puisse être considérée comme scénario est en effet contestée par certains auteurs qui estiment que c'est la description de la trajectoire du système qui donne au scénario son caractère logique. Ainsi, Rotmans et al. (2000), définissent les scénarios comme une séquence logique et ordonnée d'images du système et y incluent la définition de forces, d'évènements et d'actions s'exerçant sur ledit système.

C'est Alcamo (2008), qui décrit de manière la plus exhaustive les différents éléments qu'un scénario peut comporter :

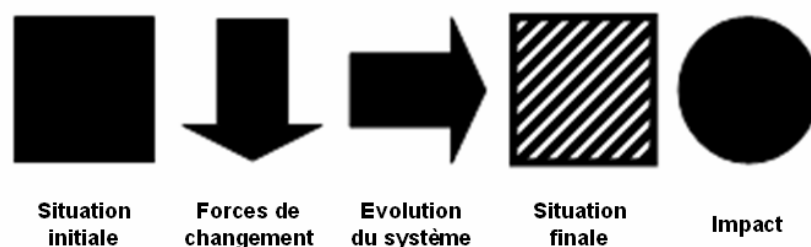
- **Une situation initiale du système.** La situation initiale est la description du système pour une année de référence, appelée « année de base » (*base year*) par Alcamo

(2008), pour laquelle il est possible de caractériser le système. Idéalement, elle correspond à l'état actuel du système. Dans les faits, elle est souvent Nous appellerons aussi cette situation initiale la « **situation de référence** ».

- **Des forces de changement.** L'évolution de tout système est motivée par des forces de changement externes ou internes au système, et leurs propres évolutions. La description de ces forces et de leurs évolutions permet donc de justifier la logique du scénario (Rotmans et al., 2000).
- **L'évolution du système.** Soumis à un jeu de forces de changement et leur évolution, le système va évoluer (se déformer, se déplacer). La trajectoire de cette évolution peut, elle aussi, être décrite dans le scénario. L'évolution d'un système d'un même état initial à un même état final peut être le fruit d'une évolution tendancielle ou intégrant des ruptures, c'est à dire marquée par un ou des événements particuliers. Rotmans et al. (2000) définissent cette trajectoire comme une séquence logique d'images du futur.
- **Une image du système dans le futur.** Cette image est généralement accompagnée d'un horizon temporel, date à laquelle on désire décrire le système. C'est aussi ce que j'appelle la « **situation finale** ».
- **Des indicateurs d'impact.** Ce dernier élément n'est pas explicitement exprimé ainsi par Alcamo (2008). En effet celui-ci introduit la nécessité d'avoir plusieurs images du futur pour permettre la comparaison de scénarios. Or, la comparaison de scénarios se fait le plus souvent au travers d'indicateurs d'impact. C'est pourquoi j'identifie comme cinquième élément clef d'un scénario son impact, qualifié par différents indicateurs.

Finalement, je propose de représenter les différents éléments des scénarios par les symboles de la Figure 1. Je reprendrai ces symboles par la suite pour préciser l'objet de ma thèse.

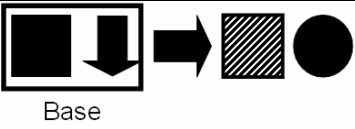


Figure 1 : Les éléments clefs des scénarios



La description du scénario en 5 éléments clefs que je propose en m'inspirant d'Alcamo (2008) est la plus complète, mais dans la bibliographie il existe des subtilités autour de la définition des éléments d'un scénario. Dans le Tableau 1, je propose trois exemples bibliographiques

dans lesquels les scénarios (en tant qu'objet) ne comportent pas les mêmes éléments que ceux que je retiens. Ce tableau m'offre aussi l'occasion de vous présenter la manière dont je mobiliserai les symboles définis précédemment au cours de ce mémoire.

Tableau 1 : Exemples de variantes autour de la définition des éléments clefs des scénarios

Variante	Eléments clefs décrits
Il existe une certaine variabilité dans la définition des éléments : par exemple Godet (1991) identifie comme un seul élément (appelé « base ») la représentation de la situation initiale du système et la description des forces de changement.	
Les 5 éléments que j'ai proposés ne sont pas forcément inclus dans la description des scénarios : par exemple Postma et Liebl (2005), Therond et al. (2009) ou Janssen et al. (2009) décrivent uniquement leurs scénarios par les forces de changement et leur évolution.	
Van Notten et al. (2003) ou Börjeson et al. (2005) acceptent la définition de scénario comme une simple image du futur (<i>snapshot scenario</i>).	

I.1.2.2. Typologies de scénarios

La majorité des auteurs ayant effectué des revues bibliographiques sur des approches permettant de construire et d'évaluer des scénarios a essayé de les classifier en tant qu'objet, produit d'une démarche. Tous s'accordent à dire que construire des typologies à partir d'un matériel si vaste est un exercice difficile. D'où une grande diversité dans la manière de classifier les scénarios (Janssen et al., 2009). Certains critères de classification demeurent cependant communs à toutes ces typologies : l'objectif du scénario, son point de départ et la nature des informations qu'il contient (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Possibilités de classification des scénarios en tant qu'objet

<i>Critère de classification des scénarios</i>	Objectif	Point de départ	Nature des informations
<i>Modalités possibles</i>	prédictif exploratoire normatif	état initial état final	quantitative qualitative

- **L'objectif du scénario** (donc sa raison d'être) définit la nature prédictive, exploratoire ou normative du scénario. Un scénario prédictif caractérise l'avenir probable du système étudié. Il est aussi appelé prospective ou *foresight* en anglais. De plus en plus d'auteurs, comme Rotmans et al. (2000), Alcamo (2008) ou Postma et Liebl (2005), remettent en cause ce type de scénario. Ils argumentent que la construction de scénarios est précisément justifiée par le fait que l'avenir est incertain, et qu'il est donc impossible de le prédire. Ces auteurs préfèrent utiliser les scénarios pour leurs qualités exploratoires. Un scénario exploratoire définit un avenir possible d'un système. Greeuw et al. (2000) regroupe les scénarios prédictifs et exploratoires dans une même catégorie, les scénarios descriptifs, qu'elle oppose aux scénarios normatifs. Un scénario descriptif peint des avènements probables ou possibles d'un système indépendamment de la désirabilité de cet avenir, tandis que l'objectif des scénarios normatifs est d'explorer les trajectoires pour parvenir à des futurs définis *a priori*, généralement désirés ou que l'on veut éviter, du système étudié (Greeuw et al., 2000 ; Van Notten et al., 2003 ; Börjeson et al., 2005). Le scénario normatif comporte donc une dimension de planification. Il peut par exemple permettre de répondre à la question : quelles normes faut-il mettre en place pour atteindre un objectif donné portant sur l'état du système ? Quel que soit l'objectif affecté au scénario, les scénarios sont construits en vue d'éclairer l'impact d'actions présentes (ou futures) sur l'état du système.
- **Le point de départ du scénario** (*vantage point* est le terme proposé par Van Notten et al., 2003) est un autre critère de classification possible des scénarios. Ce point de départ est la description de l'état du système à partir duquel est construit le scénario. En effet, le scénario peut être construit à partir de la situation initiale du système, situation présente idéalement, ou passée. Mais il peut aussi être développé à partir d'un état final, spécifique du système. L'exercice de construction du scénario vise alors à définir alors la ou les trajectoires permettant d'atteindre cet état final à partir de l'état présent. En anglais, on appelle ces deux types de scénarios *forecasting* (point de départ = situation initiale) et *backcasting* (point de départ = situation finale). La majorité des auteurs associe les scénarios *forecasting* à des scénarios exploratoires et les scénarios *backcasting* à des scénarios normatifs (Greeuw et al., 2000 ; Van Notten et al., 2003 ; Börjeson et al., 2006). Mais comme le soulignent certains, dans les scénarios *backcasting*, l'état final n'est pas forcément désiré, il peut être supposé (Rotmans et al., 2000), possible, probable et même indésirable (Godet et Roubelat,

1996 ; Alcamo, 2008). Des scénarios *backcasting* peuvent donc être aussi bien normatifs qu'exploratoires.

- La **nature qualitative ou quantitative du scénario** est un autre critère de classification des scénarios. Un scénario est quantitatif ou qualitatif selon la nature des informations qu'il comporte. Les scénarios qualitatifs privilégient l'utilisation de supports visuels (comme des schémas, des images, des diagrammes) ou narratifs (phrases, textes) pour décrire les futurs possibles du système au détriment de l'utilisation de valeurs numériques (Alcamo, 2008). Les scénarios quantitatifs ont recours à de l'information numérique (qui peut elle aussi contenir de l'information visuelle, par exemple un graphique contenant des valeurs), ou narrative.

D'autres critères de classification habituellement rencontrés dans ces études sont l'étendue de la zone d'étude (globale, locale), l'horizon temporel (court, moyen et long terme) et le domaine d'étude (environnement, industrie, économie, transports).

Ayant identifié les éléments clefs et les critères de classification des scénarios en tant qu'objet, je peux à présent proposer la définition suivante de l'objet scénario : « *Un scénario décrit de manière cohérente et logique l'état futur possible, probable ou désiré d'un système. Il peut inclure non seulement l'état futur du système et son impact, mais également la situation initiale du système, son évolution et les forces qui ont provoqué cette évolution (cf. Figure 1). Le scénario peut être construit en commençant par l'état initial ou final du système. Sa description peut être qualitative ou quantitative* ».

I.1.3. L'approche scénario

L'approche scénario est une procédure qui met en œuvre des participants et des méthodes pour construire les différents éléments clefs des scénarios. Dans la section précédente, nous avons vu que les auteurs se sont beaucoup intéressés aux scénarios en tant qu'objet. Ces auteurs s'accordent tous à penser que la procédure adoptée pour construire ces scénarios est aussi, voire plus intéressante que le scénario lui-même, puisque c'est souvent celle-ci qui permet d'impliquer les acteurs et de faciliter les processus d'apprentissage, d'échange (des connaissances), et de décision (Hulme et Dessay, 2008). Pour parler de cette « procédure », les auteurs utilisent divers qualificatifs : approche, démarche ou méthode, qu'il convient de préciser. Dans ce paragraphe, je commencerai par définir ces trois termes (section I.1.3.1), puis je présenterai les critères de classification des méthodes (section I.1.3.2), et enfin les critères de classification des approches scénarios (section I.1.3.3).

I.1.3.1. Approche, démarche et méthode

Dans les dictionnaires Petit Robert (2003), Hachette (1980) ou Larousse (2009), les définitions des termes approche, démarche et méthode font toutes référence à un cheminement, une manière de progresser, une succession d'étapes pour parvenir à un objectif. C'est Bishop et al. (2007) (cf. Encadré 1) qui distinguent le mieux ces différents termes. Nous reprendrons donc les définitions qu'ils proposent. Une approche est l'ensemble du processus entrepris par une personne ou un groupe de personnes pour conduire un projet. Elle comprend une série ordonnée d'étapes pour satisfaire les objectifs de ce projet. Le mot approche vient de l'anglais « *approach* » traduction littérale du mot démarche. Cet anglicisme est admis dans la langue courante depuis le milieu du vingtième siècle (Petit Robert, 2003 ; Larousse, 2009). Nous adopterons donc la même définition pour les deux mots « approche » et « démarche ». En parlant de méthode nous utiliserons aussi le sens proposé par Bishop et al. (2007). « Une méthode est un moyen systématique qu'un professionnel utilise pour générer un produit ». C'est la définition conformément acceptée au sens 4 du Petit Robert (2003) : un procédé technique ou scientifique. Dans le cas qui nous intéresse, ce produit est la description d'un ou de plusieurs éléments d'un scénario.

Nous définirons une approche scénario comme composée de plusieurs méthodes mobilisées à différentes étapes pour construire les différents éléments des scénarios qu'elle produit.

Encadré 1 : Le glossaire de Bishop et al. (2007)

[...] we have to decide on what a technique is in the first place, as opposed to an approach, or a method, or a tool. Therefore, we offer the following (small) glossary to distinguish these terms from each other so the reader knows what we are talking about and in hopes that other might use the terms in a similar fashion.

[...] The process that one employs in conducting a project is the **approach**. The approach consists of an ordered series of steps to accomplish the objectives of the project. Every project has an approach, whether it is explicitly articulated at the beginning or not. Some approaches are widely practices, such as the approach to develop a strategic plan. [...].

A **method or technique** is the systematic means that a professional uses to generate a product. [...].

A **tool**, another term often confused with method or technique, is more concrete. A tool is a device that provides mechanical or mental advantage in accomplishing a task. Tools are things like videoprojectors, questionnaires, worksheet and software programs. By the same token, scenarios and plans are not tools.

I.1.3.2. Critères de classification des méthodes

Il existe plusieurs critères pour classer les méthodes dans les approches scénarios. Dans un premier paragraphe je présente les critères les plus fréquemment rencontrés dans la littérature qui sont la nature des participants et la nature des scénarios produits. Dans le paragraphe suivant, je remets en cause ces critères. Dans un troisième paragraphe je formule une nouvelle classification des méthodes utilisées dans les approches scénario.

Classification des méthodes selon la nature des participants et des scénarios produits

Pour la majorité des auteurs, la nature des informations produites pour caractériser les scénarios est un critère distinctif des méthodes. Ils dissocient généralement les méthodes quantitatives, produisant des scénarios quantitatifs, et des méthodes qualitatives produisant des scénarios qualitatifs. Ce critère (déjà rencontré pour classer les scénarios en tant qu'objet) est souvent combiné à un deuxième critère, la nature des personnes mobilisées. Le plus souvent les auteurs opposent les méthodes mobilisant uniquement des scientifiques et/ou des experts à celles mobilisant ces mêmes scientifiques et/ou experts et des acteurs, c'est-à-dire des porteurs d'enjeux. Le Tableau 3 présente les types de méthodes identifiées par différents auteurs selon ces deux critères de classification. On voit ainsi que certains, comme Van Notten et al. (2003), ne considèrent pas toutes les combinaisons. Leur typologie n'identifie que deux méthodes : la méthode⁴ intuitive qui repose sur l'élicitation⁵ de connaissances et de logiques qualitatives pouvant émaner d'acteurs, d'experts ou de chercheurs et la méthode formelle qui mobilise des outils permettant de produire des informations quantitatives. À l'opposé, Alcamo (2008) considère toutes les combinaisons possibles.

Popper (2008) définit en plus les méthodes semi-quantitatives, méthodes utilisant des modèles mathématiques pour quantifier la subjectivité et les perceptions des personnes impliquées. Ces méthodes n'apparaissent pas dans le tableau suivant.

⁴ Ils utilisent le terme « *approach* », mais comme nous l'avons vu dans la section I.1.3.1, la signification des termes approche, démarche et méthode peut varier d'un auteur à l'autre. Dans ce cas, Van Notten et al. (2003) utilisent le terme *approach* pour désigner ce que nous avons défini comme méthode.

⁵ En Gestion des Connaissances, "éliciter" est l'action d'aider un expert à formaliser ses connaissances pour permettre de les sauvegarder et/ou les partager (<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89licitation>) (Bécu, 2006).

Tableau 3 : Classification des méthodes selon la nature des participants et la nature du scénario produit

Nature des participants	Nature du scénario produit	
	quantitative	qualitative
Acteurs et chercheurs et/ou experts	méthode hybride (Greeuw et al., 2000)	
	méthode participative quantitative (Alcamo, 2008)	méthode participative qualitative (Alcamo, 2008) méthode intuitive (Van Notten et al., 2003)
Chercheurs et/ou experts	méthode analytique quantitative (Greeuw et al., 2000 ; Alcamo, 2008) méthode formelle (Van Notten et al., 2003)	méthode analytique qualitative (Greeuw et al., 2000 ; Alcamo, 2008)

Remise en cause de cette classification

Dans la littérature, la classification selon la nature des participants et la nature des scénarios produits est bien formalisée. Cependant, un constat est que les auteurs assimilent le plus souvent les méthodes qui mobilisent des chercheurs ou experts à des méthodes qui produisent des scénarios quantitatifs et parallèlement ils assimilent les méthodes qui mobilisent des acteurs à des méthodes qui produisent des scénarios qualitatifs. Pour établir ces rapprochements, ils évoquent le mode de production de l'information. Les modes de production qu'ils évoquent sont le calcul numérique et la narration. Selon eux, le « calcul numérique » nécessite le recours à un ordinateur (Greeuw et al., 2000 ; Rotmans et al., 2000 ; Van Notten et al., 2003). Il est utilisé par les chercheurs et/ou experts pour produire des scénarios quantitatifs. Selon le dictionnaire Larousse (2009) : « La narration est l'action de raconter des faits sous forme littéraire ». Elle est utilisée avec des chercheurs, des experts et des acteurs pour produire de l'information que les auteurs assimilent à qualitative. Pourtant, la littérature montre qu'il est possible de construire de l'information qualitative ou quantitative quel que soit le mode de production de l'information. Par exemple, des méthodes impliquant des acteurs n'excluent pas le recours à du calcul numérique (ex. Etienne et al., 2003 ; Therond et al., 2009). Bien que le mode de production de cette information (narratif ou calculatoire) soit évoqué dans ces classifications, il n'est pas explicitement mobilisé pour établir des typologies.








De plus, nous avons vu que les auteurs classent les méthodes selon la nature quantitative ou qualitative du scénario produit. Or une approche scénario peut mobiliser plusieurs méthodes, et par conséquent un scénario peut comporter conjointement des informations quantitatives et qualitatives. Je propose donc de distinguer les méthodes quantitatives et les méthodes qualitatives selon la nature des informations qu'elles produisent et non selon la nature des scénarios produits dans l'approche scénario.

Classer les méthodes selon le mode de production de l'information et la nature de l'information produite

Je propose, dans cette thèse, de classer les méthodes non par la nature des participants mais par le mode de production de l'information. Nous distinguerons deux types de mode de production : (1) la narration (méthodes narratives) (2) le calcul numérique (méthodes calculatoires). Nous incluons dans cette dernière catégorie toutes les méthodes qui ont recours à des modèles pour effectuer des calculs numériques (dynamiques, statistiques etc.). Je représente ces critères dans le Tableau 4.

De la même manière que pour les éléments des scénarios je propose dans le Tableau 4, des symboles pour représenter les critères de classification des méthodes.

Tableau 4 : Classification des méthodes selon le mode de production de l'information et la nature de l'information produite

		Nature de l'information produite	
		Qualitative Méthode qualitative 	Quantitative Méthode quantitative \sqrt{X}
Mode de production de l'information	Narration Méthode narrative 		 *
	Calcul numérique Méthode calculatoire 	 *	

* Méthode nécessitant une traduction

Si l'utilisation d'un support narratif pour produire de l'information qualitative ou celle d'un support calculatoire pour produire de l'information quantitative est très largement acceptée pour les auteurs cités précédemment, il convient de discuter des deux autres. Plusieurs exemples montrent qu'il est possible de produire de l'information quantitative à partir d'un discours narratif. Si cette information est destinée à être utilisée par un modèle calculatoire (qui permettra par exemple de décrire un autre élément d'un scénario), l'information quantitative produite de manière narrative peut ne pas être adaptée, elle nécessitera d'être interprétée pour satisfaire les besoins du modèle. De la même manière, la production

d'information qualitative à partir de sorties de modèles numériques nécessitera une traduction des données quantitatives en données qualitatives. Le problème que je soulève ici est appelé le « double problème de conversion » par Alcamo (2008), ou Therond et al. (2009). Il est nécessaire pour remédier à ce problème d'associer les personnes développant les modèles calculatoires à ses utilisateurs potentiels (chercheurs, experts ou acteurs) afin de leur demander de produire eux-mêmes de l'information quantitative. Citons deux exemples de cette collaboration développeur-utilisateur :

La première consiste à co-construire le modèle calculatoire avec les personnes destinés à utiliser la méthode. Elle peut permettre aux utilisateurs de formaliser l'information quantitative qui doit être utilisée en données d'entrée du modèle de simulation (Antona et al., 2004). Elle peut aussi permettre aux utilisateurs de préciser les règles reliant les sorties quantitatives d'un modèle à des jugements qualitatifs (Sadok et al., 2009). La deuxième méthode consiste à développer des méthodes permettant de quantifier le jugement d'utilisateurs, ou de qualifier les sorties des modèles à partir des jugements d'utilisateurs. Alcamo (2008) cite l'exemple des fonctions d'adhésion (*membership functions*).

I.1.3.3. Typologies d'approches scénarios

Les approches scénarios sont généralement classées selon le contexte dans lequel elles sont conduites. Popper (2008) propose explicitement neuf critères de classification portant sur les approches permettant d'explorer le futur⁶ dont une est l'approche scénario. Nous en retiendrons seulement sept, particulièrement pertinents pour notre démonstration :

- Le contexte géographique de recherche et développement (Europe, Asie, Amérique du Nord) ;
- Le secteur dans lequel est développé l'étude (industrie, agriculture, électricité), l'échelle territoriale (infra-nationale, nationale, supra-nationale) ;
- L'horizon temporel ;
- La nature des financeurs (recherche, gouvernement, entreprise) ;
- La nature des participants à l'approche : contrairement aux autres auteurs, il distingue la nature des participants selon leur appartenance au gouvernement, à la recherche, à une entreprise, à une organisation de commerce ou à une organisation non gouvernementale ;
- Le nombre de participants ;

⁶ Il distingue aussi ces approches (*foresight*) par l'objet qu'elles doivent produire (ex. recommandation politique, scénario, analyse de forces de changement etc.)

- La combinaison des méthodes : la majorité des approches ont recours à un enchaînement de plusieurs méthodes.

Les autres auteurs (Greeuw et al., 2000 ; Van Notten et al., 2003 ; Börjeson et al., 2006 ; Simon et al., 2006) ajoutent à ces critères les champs disciplinaires mobilisés (agronomie, sociologie etc.), le secteur (industrie, agronomie, services etc.), le sujet étudié (démographie, usages du sol, marché économique etc.), et enfin les échelles spatiales et temporelles.

Du fait de la forte dépendance entre approche et scénario produit (Hulme et Dessay, 2008 ; Van Notten et al., 2003), les critères « objectif poursuivi » et « point de départ » des scénarios sont également utilisés pour classer les approches. Pour illustrer cette forte dépendance, on peut noter qu'Alcamo (2001) appelle approches exploratoires des approches qui développent des scénarios exploratoires. Il recommande de développer un jeu limité de scénarios contrastés dans de telles approches. De même, une approche *backcasting* consiste à construire le scénario à partir de sa situation finale. La nature des scénarios à produire a donc un impact sur la nature et l'enchaînement des méthodes mises en œuvre. Autrement dit, la nature des scénarios à produire a un impact sur l'approche mise en œuvre pour les produire.

Une approche scénario mobilise un ensemble de méthodes pour construire les différents éléments des scénarios qu'elle doit produire. Popper (2008) remarque que la majorité des approches scénario ont recours à un enchaînement de plusieurs méthodes. La sélection d'une méthode conditionne la sélection d'une autre méthode. C'est ce constat qui l'amène à considérer la combinaison des méthodes comme un critère de classification de l'approche.

On assiste à une évolution apparemment contradictoire des approches scénarios. Alors qu'elles s'appuient de plus en plus sur des méthodes calculatoires, elles recourent de plus en plus souvent à des méthodes participatives. Elles sont donc contraintes de convertir de l'information (quantitative ou qualitative) produite narrativement lors d'un processus participatif en information quantitative utilisable par un modèle calculatoire. L'avantage de ce type d'approche est souligné par Rotmans et al. (2000) et Alcamo (2008) qui argumentent que l'utilisation de modèles calculatoires confère une crédibilité scientifique aux scénarios produits, tandis que le recours à une description narrative permet une meilleure compréhension et appropriation des scénarios produits. Le problème de conversion (Alcamo, 2008 ; Therond. et al., 2009) décrit précédemment (section I.1.3.2) se pose donc aussi au niveau de l'approche scénario. Dans une approche scénario, l'utilisation d'une méthode calculatoire est nécessairement associée à une ou des méthodes qualitatives, impliquant ainsi

une approche « semi-quantitative »⁷. Même si l'objectif est d'utiliser des modèles calculatoires pour produire des scénarios quantitatifs, la phase initiale de l'approche scénario implique une phase narrative. Cette phase initiale consiste à faire des hypothèses sur les avènements possibles, probables, ou désirés. Qu'elles soient quantitatives ou qualitatives, ces hypothèses sont narratives et nécessitent d'être traduites en entrée de modèles. De même, la phase finale de l'approche nécessite souvent le recours à une description qualitative, ou du moins narrative, du scénario (une reformulation verbale ou visuelle des résultats chiffrés). Elle sera ainsi plus explicite aux yeux des utilisateurs (Alcamo, 2008) que les sorties brutes d'un modèle de simulation. La nécessaire collaboration entre développeurs et utilisateur pour mettre en œuvre certaines méthodes (cf. section I.1.3.2) s'impose aussi pour mettre en œuvre une approche scénario.

1.2. Des scénarios d'usages du sol pour la gestion conjointe des territoires et des ressources naturelles

Nous avons vu en introduction que les scénarios d'usages du sol sont des outils pertinents pour la planification de la gestion spatiale de l'eau. Dans cette thèse je m'intéresse à cette gestion spatiale de l'eau en territoire agricole. En conséquence, dans cette section, j'analyse un ensemble d'articles décrivant des approches développant des scénarios d'usages du sol en territoire agricole. Je m'appuierai pour cela sur la grille de lecture proposée dans la section précédente (I.1.3). Je décris d'abord les éléments clef des scénarios d'usage du sol (section I.2.1). Cette description m'emmène à identifier une notion spécifique à ces scénarios : les facteurs de localisation (section I.2.2). Finalement, je décris les méthodes mobilisées pour décrire chacun des éléments clefs dans des approches scénarios (section I.2.3).

1.2.1. Les éléments clefs des scénarios d'usages du sol

Dans les scénarios d'usages du sol, le système étudié est un territoire cohérent vis-à-vis de la ressource naturelle en jeu. Ce territoire est décrit par la distribution de ses usages du sol. Ce territoire peut être caractérisé par ses frontières, ses usages du sol, ainsi que des forces internes ou externes faisant évoluer la distribution des usages du sol. La description suivante

⁷ Les experts disent approche, méthode, ou scénario « semi-quantitatif (ve) », ils pourraient aussi bien dire « semi-qualitatif (ve) »

des éléments clefs des scénarios nous permettra de mieux appréhender ces différents composants.

Les scénarios d'usages du sol, comme les autres scénarios, peuvent comporter un ou plusieurs des cinq éléments clefs définis précédemment : situation initiale, forces de changement, évolution du système, situation finale et impacts.

I.2.1.1. Situation initiale



La situation initiale, ou “situation de référence”, est le plus souvent décrite sous la forme d'une carte d'usages du sol. La

forme des unités cartographiques et la nature de leur contenu peuvent varier selon la nature des processus explorés dans le scénario et le territoire considéré. Le territoire considéré est découpé en unités élémentaires. Dans certains cas, ces unités élémentaires sont des mailles identiques en taille et en forme. Elles résultent d'un découpage systématique du territoire en une grille de mailles uniformes. A chacune de ces mailles est affecté un usage particulier du sol comme pour Etienne et al. (2003), Verburg et al. (2006), ou Castella et al. (2007). Dans d'autres cas, les unités élémentaires, ou unités de support, sont de formes et de tailles variables. A chacune de ces unités de support sont affectés soit un usage unique du sol (Stolte et al., 2005), soit différents usages. Pour ce dernier cas, la proportion de chaque usage au sein de l'unité de support est spécifiée (Mourad et al., 2005). L'usage du sol peut être décrit par des variables de nature et de nombre différents.

Dans la plupart des scénarios d'usages du sol développés pour la planification des territoires agricoles, la situation initiale est une mosaïque des principaux couverts végétaux agricoles. Dans de nombreux cas, les systèmes de culture sont au mieux représentés seulement par la culture : ni les successions culturales, ni les pratiques agricoles associées à ces couverts ne sont décrites. Par exemple, Stolte et al. (2005) qui ne considèrent que six usages agricoles du sol en fonction de leur impact sur l'érosion, ne distinguent pour le couvert grandes cultures ni les cultures ni les pratiques associées. Dans certains cas, la représentation des systèmes de culture est effective mais simplifiée car les chercheurs ont besoin d'explicitier seulement certaines caractéristiques des systèmes de culture pour résoudre leur question. Ainsi, Höll et Andersen (2002) caractérisent la situation initiale de leur territoire par une distribution des potentiels du paysage à satisfaire des services environnementaux (biodiversité, bois, eau potable) et sociaux (protection d'un héritage culturel archéologique). Pour définir ces potentiels, ils intègrent des densités d'élevage et des pratiques de fertilisation. Wechsung et al. (2000) définissent les systèmes de culture comme des rotations sur dix ans de six cultures

principales et jachère. La description simplifiée des systèmes de culture peut aussi être associée à une distribution d'exploitations type dans lesquelles sont définis un assolement moyen et les pratiques qui affectent le territoire considéré. Van der Werf et al. (2007) décrivent une distribution d'exploitations type et spécifient pour chacune l'assolement et les pratiques relatives à l'élevage de porcs.

La distribution usages du sol est spatialement explicite lorsque les limites des différents usages du sol sont explicitement localisées dans l'espace. C'est le cas lorsqu'un seul usage du sol est identifié par unité de support, que celle-ci soit une maille régulière ou un polygone de forme quelconque comme dans Wang et al. (2008). Dans ce dernier cas, la forme du polygone est généralement déterminée par un ou plusieurs autres facteurs. Pour Wang et al. (2008), ces facteurs sont le sol, la pente et l'usage du sol (agricole ou non): ils associent un usage du sol à chaque combinaison sol-pente. La caractérisation de la distribution initiale des usages du sol est d'ailleurs souvent associée à la caractérisation d'autres variables du territoire d'étude. Ainsi, Stolte et al. (2005), associent la représentation spatiale de systèmes de culture avec une carte des sols pour étudier l'impact des politiques agricoles sur l'érosion. Höll et Andersen (2002), l'associent à quatre cartes où sont localisées les priorités concernant la protection et l'amélioration des espaces pour (1) le milieu naturel, (2) l'accès à l'eau potable, (3) la forêt et (4) les sites archéologiques.

I.2.1.2. Forces de changement



Les forces de changement pouvant influencer l'évolution des usages du sol, et notamment les usages agricoles, sont très diverses. Elles peuvent être sociales (démographie, culture, emploi, etc.), économiques (prix, demande en biocarburants, emploi etc.), environnementales (climat, ressource, etc.), politiques ou réglementaires (politique agricole, directive européenne, etc.) ou encore technologiques (équipement individuel, choix de système de production, infrastructure publique). De nombreuses études de scénarios utilisent les combinaisons de forces (et de leurs évolutions) identifiées par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) dans le but de produire des scénarios sur l'évolution du climat et les émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2000). Le jeu de forces du GIEC décrit deux évolutions possibles de deux forces : les marchés (régionalisation, mondialisation) et le rôle des Etats dans la politique (intervention, laisser-faire). Il en résulte quatre combinaisons d'évolutions possibles des deux forces de changements (Figure 2).

Figure 2 : Classification de 25 scénarios d'usages du sol provenant de 6 approches différentes en fonction des forces de changement prises en compte dans les scénarios du GIEC (Bush, 2006).



Ces combinaisons d'évolutions de forces de changement (marché et rôle des Etats) ont été définies à l'échelle globale. Elles sont externes au système étudié (si ce système n'est pas le monde). Nous pouvons distinguer deux types de forces : les forces externes et les forces internes au système. Par exemple, Dockerty et al. (2006), qui étudient les futurs possibles d'un bassin versant du Royaume-Uni, définissent l'évolution des prix du marché comme une force de changement externe au territoire. Reidsma et al. (2006) définissent des forces internes au système, comme l'évolution du prix des terres, à partir des quatre jeux de forces globales du GIEC. Selon le territoire étudié, certaines forces de changement peuvent être définies comme externes ou internes au système. Par exemple, la variation des prix des cultures dans la mesure où elle est décidée à l'échelle de la Communauté européenne, sera une force interne au système si la zone d'étude est la Communauté européenne, et externe si la zone d'étude est une région européenne. Certaines approches n'utilisent pas le jeu du GIEC pour développer leurs forces de changement. Etienne et al. (2003) utilisent des forces qui sont les stratégies des acteurs du système étudié (par exemple, un retour progressif aux pâturages vs. un retour immédiat au pâturage).

I.2.1.3. Evolution du système



Lorsqu'elle est décrite, l'évolution du système est une modification progressive dans le temps (pas à pas) de la distribution des usages du sol. Cette évolution est en général décrite en fonction de comportements d'entités spatiales constitutives du territoire considéré. Elle peut être le

résultat de comportements d'acteurs (Etienne et al., 2003) ou d'exploitations (Van der Werf et al., 2007). Elle peut aussi être le résultat de règles de transition d'usages du sol (Houet, 2006). Ces règles peuvent traduire les pratiques d'assolement présentes et passées ou justement des changements dans ces pratiques d'assolement. Dans les deux cas l'évolution du système est aussi expliquée par des facteurs variables dans le territoire et caractéristiques de celui-ci. Ces facteurs peuvent être environnementaux (sol, climat), économiques (proximité d'une coopérative), techniques (sol irrigable ou non) ou sociaux (proximité de main-d'œuvre).

I.2.1.4. Situation finale



De l'évolution du système résulte une situation finale, distribution spatiale des usages du sol dans le territoire.

Lorsque l'évolution du système est décrite (évolution de la distribution des usages du sol dans le territoire considéré), la situation finale du système est la distribution des usages du sol à un instant t , horizon temporel du scénario. Des auteurs comme Wechsung et al (2000), Stolte et al. (2005), Wang et al. (2006), Lavigne et al. (2008) ou Viaud et al. (2008) décrivent uniquement la distribution alternative des usages du sol sans spécifier l'horizon temporel. La distribution usages du sol est alors décrite en fonction de facteurs variables dans le territoire, et caractéristiques de celui-ci, comme c'est le cas pour l'évolution du système (section I.2.1.3).

I.2.1.5. Impacts



L'inventaire des indicateurs permettant d'évaluer les scénarios d'usages du sol en milieu agricole montre que la plupart du

temps, ils sont destinés à évaluer l'impact environnemental d'un scénario. C'est pourquoi Diamond (2005, cité par Mahmoud et al., 2009) appelle les scénarios d'usages du sol des scénarios environnementaux. Ces indicateurs peuvent cependant être des indicateurs caractérisant une pression environnementale, économique ou sociale ou son impact.

Les indicateurs de pression sont en général mobilisés pour caractériser une pression environnementale sur :

- la qualité de l'eau (Agence Européenne de l'environnement, 2009 ; Mourad et al, 2005 ; Höll and Andersen, 2002) : ex. taux de sédimentation (ex. Mourad et al., 2005) ou les concentrations d'azote (ex. Höll and Andersen, 2002) ;
- la biodiversité : ex. apports d'azote (ex. Höll et Andersen, 2002), flux de gènes (Angevin et al., 2008).

Des indicateurs d'impact sont aussi mobilisés pour décrire l'impact des scénarios sur :

- l'environnement : ex. distribution spatiale des usages du sol (ex. Etienne., 2003 ; Reidsma et al., 2006) ;
- les paysages : ex. continuité du paysage (Palang et al., 2000) ; acceptation du paysage (Dockerty et al., 2006) ;
- l'économie et la société : ex. revenus (Castella et al., 2005 ; Westhoek et al., 2006) ; production (Höll et Andersen, 2002 ; Castella et al., 2005 ; Van Meijl et al., 2006, Therond et al., 2009).

I.2.2. Les facteurs de localisation, une notion spécifique des scénarios d'usages du sol

Nous avons vu que pour spatialiser l'évolution des usages du sol et/ou leur position dans la situation finale, les auteurs qui développent des scénarios ont recours à des facteurs variables dans l'espace (sections I.2.1.3 et I.2.1.4). Ces facteurs sont également associés à la description de la situation initiale (section I.2.1.1). J'appelle ces facteurs : « facteurs de localisation ». Je reprends ainsi la terminologie de Verburg et al. (2006) qui désignent, par facteurs de localisation, les variables déterminant la localisation spatiale du changement à des niveaux inférieurs au territoire considéré.

Certains auteurs considèrent ces facteurs comme des forces de changement (Bürgi et al., 2004 ; Verburg et al., 2006). Veldkamp et Fresco. (1997) s'opposent à cette équivalence. Ils constatent par exemple que le potentiel de rendement d'une culture ne peut pas être considéré comme une force. Le potentiel de rendement n'est ni un phénomène, ni un événement qui causera le changement de la distribution des cultures mais seulement un facteur qui déterminera la localisation de ce changement. Bürgi et al. (2004) et Verburg et al. (2006) considèrent les facteurs de localisation comme des forces de changements. Ils utilisent la notion de forces de changement emboîtées (gigognes) : si la force de changement primaire est le prix d'une culture alors le rendement potentiel sera une force de changement à un niveau inférieur (secondaire, tertiaire ou quaternaire). Bürgi et al. (2004), pour désigner un facteur de localisation, adoptent le terme de force de changement située (*site specific*).

Finalement, nous pouvons considérer les facteurs de localisation comme des variables descriptives spécifiques des systèmes étudiés dans les approches scénarios d'usages du sol. Ils permettent d'affecter un usage du sol à une unité spatiale du territoire considéré dans la description de l'évolution du système ou de son état final.

Les facteurs de localisation les plus rencontrés dans les scénarios d'usages agricole du sol sont le climat (Cohen, 1997) ; les sols (De Köning et al., 1999 ; Wechsung et al., 2000 ; Stolte et al., 2005) ; des éléments structurels du territoire du type distance à une route, une rivière, une forêt, une pente (De Köning et al., 1999 ; Etienne et al., 2003) ou type d'exploitation (Höll and Andersen, 2002 ; Rounsevell et al., 2003). Les facteurs de localisation peuvent aussi résulter de la combinaison d'autres facteurs de localisation : par exemple, le rendement potentiel, utilisé comme facteur de localisation par Veldkamp et al. (1997) ou Münier et al. (2004), est une notion qui intègre les facteurs de localisation sol, climat et pente.

Comme ces facteurs de localisation permettent, selon les cas, de définir l'évolution du système (Etienne et al., 2003) ou l'état final du système (Wechsung et al., 2000 ; Stolte et al., 2005), il est indispensable de les représenter dans la situation initiale du système.

I.2.3. Les méthodes pour caractériser les élément des scénarios d'usages du sol en milieu agricole

Dans cette section, je liste les méthodes utilisées pour caractériser chaque élément des scénarios d'usages du sol en territoire agricole. Je les situe par rapport aux deux critères retenus à l'issue de la section I.1.3.2 : la nature des informations produites (quantitative ou qualitative) et le support mobilisées pour produire l'information (narratif ou calcul numérique).

I.2.3.1. Etat initial du système



Un système d'information géographique (SIG) est le moyen le plus communément utilisé pour caractériser la situation initiale.

Les SIG permettent de définir les unités de support et pour y affecter un contenu. Ils permettent d'associer à la description de la situation initiale en termes d'usages du sol d'autres couches d'informations pertinentes pour le sujet de l'étude (des couches représentant les facteurs de localisation). Cependant, lorsqu'il s'agit d'étudier la distribution de pratiques agricoles autres que la culture pour affiner la description de l'usage du sol, les données sont souvent manquantes ou incomplètes. C'est ce que soulignent Leenhardt et al. (2009) qui comparent quatre méthodes pour caractériser la distribution des systèmes de culture à l'échelle régionale. Qu'elles soient quantitatives, qualitatives, narratives ou mobilisant des modèles calculatoires, les quatre méthodes utilisées ont pour objectif de décrire la distribution des systèmes de culture. Comme nous l'avons vu en section I.2.1.1, cette distribution est une

reconstruction de la distribution présente, idéalement, ou passée des systèmes de culture du territoire considéré.

Les méthodes utilisées pour décrire la situation initiale de manière quantitative ont recours à des bases de données, spatialement explicites ou non. Des méthodes calculatoires comme narratives peuvent servir à reconstruire la distribution des systèmes de culture à partir de ces bases de données. Elles permettent de résoudre les problèmes d'insuffisance des données ou de résolution spatiale non adaptée.

Dans le cas où un changement d'échelle s'impose, des méthodes calculatoires comme l'agrégation, la désagrégation, l'interpolation ou l'extrapolation apportent une solution (Faivre et al., 2004). Par exemple, pour construire la distribution des usages du sol de l'Europe (en spécifiant différents usages agricoles), Verburg et al. (2006) ont utilisé la base de données Pan-Européenne développée par Mùcher et al. (2004) qui décrit la distribution des usages du sol à une résolution de 250 m, puis ont agrégé ces données à une résolution de 1 km. Pour déterminer la distribution des facteurs de localisation, ils ont ensuite utilisé un jeu de données hétérogènes, venant des différents pays d'Europe qu'ils ont interpolées pour recouvrir l'étendue complète de l'Europe.

Il existe également des approches où sont utilisées des méthodes narratives pour obtenir des informations quantitatives. Dans ces approches, on utilise des discours narratifs pour reconstituer la distribution des systèmes de culture du territoire à partir de bases de données spatialement explicites ou non. Ces méthodes permettent par exemple d'allouer des systèmes de cultures à certaines parcelles selon des règles proposées par des experts sur la probabilité de rencontrer un système de culture en fonction d'un ou plusieurs facteurs de localisation. Il faut pour cela caractériser les principaux systèmes de cultures et leurs facteurs de localisation. Bien que son objectif ne soit pas de construire un scénario, Mignolet (2004) propose par exemple, pour décrire la distribution des systèmes agricoles du bassin de la Seine, de délimiter des zones agricoles homogènes en termes de systèmes de cultures observés en les faisant dessiner par des experts sur des fonds de carte. Elle confronte ensuite les cartes produites par les experts à des cartes représentant les données extraites du recensement général agricole (Agreste, 2002).

L'unique méthode qualitative que je présenterai pour caractériser la distribution des systèmes de culture dans un scénario d'usages du sol est celle proposée par Palang et al. (2000). C'est une méthode narrative qui consiste à dessiner un paysage en Estonie. Ce dessin ne représente pas exclusivement l'usage du sol, mais des éléments comme une route, un village ou une forêt. Il est réalisé par les chercheurs.

1.2.3.2. Forces de changement, évolution et état final du système



Les forces de changement, l'évolution du système et son état final sont dépendants les uns des autres : la description de l'un conditionne et est conditionné par la description de l'autre (ou des autres) élément(s). Suivant les choix initiaux faits dans l'approche scénario, seuls certains de ces trois éléments seront décrits. De l'étude de 20 exemples d'approches visant à développer des scénarios d'usages du sol en territoire agricole se dégagent deux types d'approches : les approches exploratoires et les approches normatives. Ces deux types d'approches sont associés à l'objectif exploratoire ou normatif des scénarios produits. Dans les approches exploratoires, les forces de changement seront systématiquement représentées. Dans les approches normatives seul l'état final du système sera représenté. Dans les deux types d'approches se dégagent des sous cas liés à la combinaison de méthodes utilisée pour décrire chaque élément du scénario. Dans la Figure 3, j'illustre les différentes combinaisons de méthodes mobilisées dans ces approches et leur sous cas.

Approche exploratoire : caractériser les forces de changement puis l'état final

Cette approche est la plus courante, elle est utilisée de l'échelle d'une ou deux parcelles (Palang et al., 2000), à celle de l'Europe (Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006 ; Therond et al., 2009) en passant par des échelles régionales (Höll et Andersen, 2002 ; Dockerty et al., 2005 ; Mourad et al., 2005).











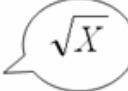


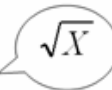

La première étape consiste à caractériser les forces de changement et leur évolution. Les méthodes mobilisées sont exclusivement narratives. Elles consistent essentiellement à développer des histoires logiques portant sur des évolutions contrastées des forces de changement. On peut distinguer deux méthodes principales : la première est participative, pas la seconde. Etienne et al. (2003), Dockerty et al. (2005), Poux (2006), Mora (2008) et Therond et al. (2009), caractérisent les forces de changement et leur évolution en procédure participative avec des experts et/ou des acteurs. Associant experts et porteurs d'enjeux, les méthodes participatives privilégient, en outre, la mixité des domaines d'expertise. Des groupes de réflexion sont ainsi de plus en plus constitués d'experts provenant d'horizons institutionnels différents et de disciplines scientifiques variées. Dans la seconde méthode, non participative, les forces et leur évolution sont caractérisées par les chercheurs seuls (Mourad et al., 2005; Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006) en se basant sur des études bibliographiques ou de l'expertise. Qu'elles soient participatives ou non, ces méthodes permettent de décrire non seulement les forces de changement mais aussi leurs

évolutions. Dans beaucoup de cas, ces méthodes permettent de caractériser un jeu de forces de changement et de leurs évolutions possibles. La construction de ces jeux consiste à : (1) identifier les forces de changement pertinentes pour le territoire considéré, (2) identifier leurs évolutions possibles et (3) combiner les évolutions possibles des différentes forces identifiées. La majorité des approches ont recours au jeu de forces identifié par le GIEC pour définir ces jeux (cf. section I.2.1.2), qu'elles détaillent selon leurs besoins (Dockerty et al., 2005 ; Mourad et al., 2005 ; Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006). Elles peuvent toutefois identifier les forces à considérer et leurs évolutions possibles sans avoir recours à ces jeux. Les forces de changements et leurs évolutions sont alors caractérisées soit au cours d'une discussion (Etienne et al., 2003 ; Therond et al., 2009), soit par des revues bibliographiques sur le territoire étudié (Palang et al., 2000 ; Höll et Andersen, 2002).

Après avoir caractérisé les forces de changement et leur évolution, la seconde étape consiste à décrire l'évolution et/ou l'état final du système. Trois sous cas existent. Ils sont représentés dans la Figure 3. Les deux premiers font appel au calcul numérique. Dans le premier cas, la description qualitative de l'évolution des forces de changement est traduite en jeux de données d'entrée d'un modèle dynamique qui intègre ces facteurs pour simuler l'évolution de la distribution des usages du sol (Veldkamp et Fresco., 1997 ; Etienne et al., 2003 ; Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006). L'état final du système est donc la distribution des usages du sol simulée par ce modèle à un temps donné et pour un horizon du scénario donné. Dans le deuxième cas, l'évolution du système n'est pas simulée (Höll et Andersen, 2002 ; Dockerty et al., 2005 ; Mourad et al., 2005 ; Therond et al., 2009). La description des forces de changement et de leur évolution est traduite en un jeu de données d'entrée d'un modèle qui simule ou optimise la situation finale du système en fonction de contraintes économiques comme les prix des intrants ou physiques comme la surface agricole maximale.

Dans le troisième cas, la description de l'état final est qualitative et l'évolution du système n'est pas décrite. Palang et al. (2000) traduisent la description des évolutions des forces de changement en un discours qualitatif sur la situation finale de leur système qu'ils illustrent par le dessin. Poux (2006) propose un ensemble de supports diversifiés tels que des photos, des phrases, des analogies avec d'autres pays, des cartes de production. Cependant, dans ces approches, les situations finales sont déduites à partir d'un raisonnement logique (narratif) portant sur les relations entre évolutions des forces de changement et évolution de la distribution des usages du sol.

Figure 3 : Combinaisons de méthodes pour décrire les forces de changement, l'évolution du système et l'état final du système dans les scénarios d'usages du sol⁸

Approche	Forces de changement 	Evolution du système 	Etat final 	références
Exploratoire			 Etat du système à un instant t	Veldkamp et Fresco (1997) Etienne et al. (2003) Van Meijl et al. (2006) Verburg et al. (2006) Westhøek et al. (2006) Therond et al. (2009)
		∅		Höll and Andersen (2002) Dockerty et al. (2005) Mourad et al. (2005)
		∅		Palang et al. (2003) Poux (2006) Mora (2008)
Normative	∅	∅		Wechsung et al. (2000) Stolte et al. (2005) Münier et al. (2004) Van der Werf et al. (2007) Wang et al. (2008)
	∅	∅		Lavigne et al. (2008) Viaud et al. (2008) Therond et al. (2009)
Légende  Méthode narrative produisant de l'information qualitative  Méthode narrative produisant de l'information quantitative  Méthode numérique produisant de l'information quantitative ∅ Élément non défini dans le scénario, pas de méthode mobilisée				

Approche normative : caractériser l'état final d'un scénario

Ce type d'approche a pour but de caractériser un avenir désiré du système pour définir les forces de changement (outils d'incitation) à mettre en œuvre pour y arriver une fois le scénario construit. C'est uniquement l'état final du système qui est décrit dans chaque

⁸ Il convient de remarquer qu'aucune approche ayant recours à des méthodes calculatoires permettant de produire de l'information qualitative n'apparaît dans cette figure.

scénario. Ni les forces de changement ni l'évolution du système ne sont caractérisées⁹. Il existe aussi deux sous cas.

Dans le premier sous cas, l'objectif est de faire varier la distribution des systèmes de cultures du territoire afin de valider des hypothèses sur la relation entre la distribution des systèmes de culture et l'impact sur l'environnement (Wechsung et al., 2000 ; Stolte et al., 2005 ; Lavigne et al., 2008 ; Viaud et al., 2008 ; Wang et al., 2008) ou sur la relation entre environnement, agriculture et économie (Münier et al., 2004). Les chercheurs affectent de manière uniforme ou selon des facteurs de localisation des systèmes de culture à des endroits donnés du territoire considéré (Wechsung et al., 2000 ; Stolte et al., 2005 ; Münier et al., 2004 ; Wang et al., 2008). Cette approche utilise une méthode narrative pour produire une description quantitative de l'état final du système. L'état final du système est en effet une distribution des systèmes de culture quantitative : elle se présente sous la forme d'une base de données explicitant les caractéristiques et les surfaces de chaque système de culture et des facteurs de localisation associés. Le recours à cette méthode est réservé aux chercheurs qui ont au préalable construit une représentation quantitative du système (situation initiale).

Dans le deuxième sous cas, les chercheurs mobilisent directement du calcul numérique pour générer la distribution finale des systèmes de culture de manière automatique. C'est le cas de Lavigne et al. (2008) et Viaud et al. (2008) qui pour étudier les transferts de pollen de maïs génétiquement modifié font automatiquement varier la forme et la taille des parcelles du territoire qu'ils étudient pour y affecter différentes proportions de maïs conventionnel et de maïs génétiquement modifié.

Dans ces deux cas, les chercheurs utilisent les scénarios pour réaliser des plans d'expérimentation virtuels. Ils définissent plusieurs situations finales dont ils peuvent évaluer l'impact à l'aide de modèles calculatoires.

I.2.4. Impacts



Lorsqu'il s'agit d'estimer les impacts, deux choix s'imposent aux approches scénarios. Le premier concerne la méthode d'estimation des indicateurs, le second concerne la base de comparaison entre les différents scénarios produits.

⁹ Une fois que l'état final du système désiré est identifié, il est possible de définir des outils d'incitation (forces de changement) à mettre en œuvre pour atteindre cet état final. Il est ensuite possible d'explorer l'impact de ces outils sur le système dans une approche exploratoire.

Estimation des indicateurs

Deux approches s'opposent : les approches utilisant exclusivement des méthodes narratives et celles recourant à des modèles. Les premières mobilisent des méthodes narratives pour évaluer qualitativement l'impact des postulats d'évolution des forces de changement, exprimées sous formes narrative (Palang et al., 2000 ; Poux, 2006 ; Mora, 2008). Mais la majorité des approches scénario traitant de l'usage agricole du sol a recours à des modèles numériques pour quantifier les indicateurs d'impact des scénarios. Une des caractéristiques récurrentes de ces méthodes est l'utilisation de modèles calculatoires distribués (on parle aussi de modèle spatialisé). La spatialisation de modèles permet en effet de produire des indicateurs à des échelles spatiales fines puis, si besoin, de les agréger à des échelles spatiales supérieures. Ces modèles peuvent être spatialement explicites. Par exemple, Wechsung et al. (2000), Mourad et al. (2005) ou Stolte et al. (2005) utilisent des modèles hydrologiques pour simuler des transferts d'eau ou de matière comme les sédiments ou nitrates d'un bout à l'autre du territoire considéré, tandis que Lavigne et al. (2008) simulent des transferts de gènes entre parcelles. Les modèles peuvent aussi être distribués sans pour autant simuler de transferts entre les différents endroits du territoire étudié. Ainsi, Höll et Andersen (2002) simulent le comportement économique des exploitations au niveau de chacune d'elles. Bien souvent les approches scénario développent une chaîne de modèles intégrant des modèles globaux et des modèles distribués spatialement explicites ou non. C'est le cas pour Bush et al. (2006), Van Meijl et al. (2006), Reidsma et al. (2006) ou encore Therond et al. (2009). L'avantage que présente l'utilisation de modèle calculatoire pour estimer les impacts est la production d'indicateurs quantifiés qui peuvent être mobilisés pour comparer ensuite les scénarios entre eux.

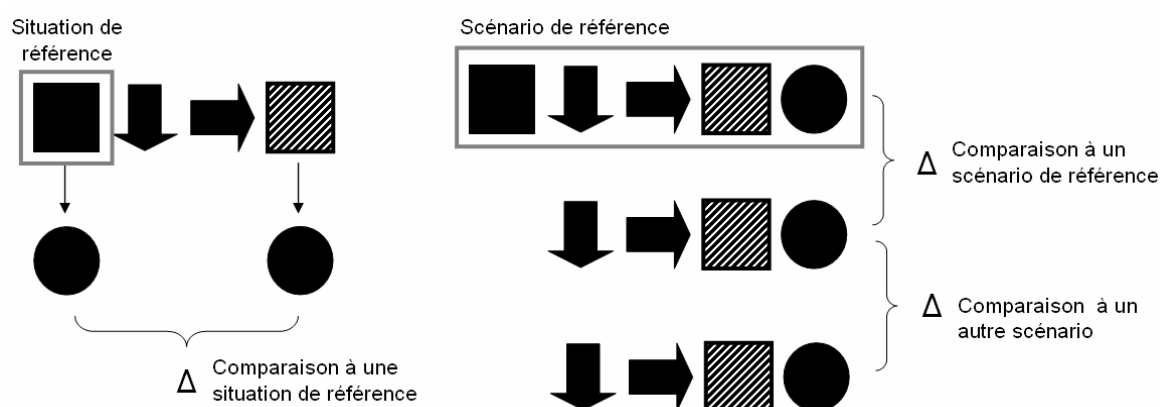
Comparaison des scénarios

La comparaison des valeurs d'indicateurs entre scénarios est souvent utilisée comme un moyen d'esquiver les problèmes de qualité des modèles utilisés pour quantifier les indicateurs d'impacts. En effet, si la qualité prédictive d'un modèle n'est pas validée par des observations de terrain, il reste possible de comparer les indicateurs simulés par le modèle pour deux situations différentes. Ainsi une référence, pour laquelle des indicateurs sont estimés par un modèle calculatoire, est souvent utilisée comme base de comparaison des valeurs d'indicateurs produits pour un scénario donné. Cette base peut être une situation de référence, un scénario de référence ou un autre scénario. La Figure 4 présente les différentes manières de comparer les indicateurs estimés pour des scénarios.

Dans la majorité des approches, le nombre de scénarios construits est faible : dans les cas que nous avons étudiés il varie de 3 (Van der Werf et al., 2007) à 10 (Wang et al., 2008). La comparaison est soit effectuée à partir d'un scénario de référence (*baseline scenario*) : scénario spécifique qui représente comme chez Veldkamp et Fresco (1997) et Höll et Andersen (2002) la projection des tendances passées dans un futur donné, ou tout simplement la situation de référence qui correspond à la situation présente du système comme chez Palang et al. (2000), Wechsung et al. (2000), Münier et al. (2004), Stolte et al. (2005) ou encore Wang et al. (2008). Certaines approches ne développent pas de scénario de référence, mais un jeu contrastés de scénarios qu'il est possible de comparer entre eux en fonction d'hypothèses établies au préalable sur les forces de changement et leurs évolutions (Etienne et al., 2003 ; Mourad et al, 2005 ; Bush, 2006 ; Poux, 2006 ; Reidsma et al., 2006 ; Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Mora, 2008). L'avantage est que les hypothèses qui sous-tendent ces jeux de forces de changement sont connues, facilement visualisables et appropriables par les décideurs.

Dans certaines approches normatives, le nombre de scénarios construits peut être largement supérieur : Lavigne et al. (2008) et Viaud et al. (2008) développent respectivement 80 et 16 scénarios. Leur objectif n'est pas de montrer les évolutions possibles de la distribution des usages agricoles du sol, mais de montrer le rôle de certains caractères de cette distribution comme la taille de la parcelle sur la dispersion du pollen des organismes génétiquement modifiés.

Figure 4 : Différents modes de comparaison des indicateurs produits pour évaluer les scénarios¹⁰



¹⁰ Dans le cas de la comparaison à un scénario de référence et de la comparaison à un autre scénario, je ne représente pas la situation initiale parce que c'est la même dans tous les scénarios. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les auteurs tendent à l'exclure de la caractérisation des éléments clefs.

CHAPITRE II. FORMULATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE

Nous avons vu en Introduction la valeur ajoutée que peut revêtir l'utilisation de scénarios d'usages du sol pour la planification conjointe des territoires et des ressources naturelles. La construction et l'évaluation de scénarios d'usages du sol favorisent en effet un processus itératif de discussion entre les acteurs d'un territoire afin de faciliter (1) la concertation autour de la définition des objectifs à atteindre en termes de distribution des usages du sol d'un territoire ; (2) l'acceptation de ses objectifs et l'acceptation des solutions mises en place par les décideurs pour atteindre ces objectifs. Ces approches, construisant et évaluant des scénarios d'usages du sol, ont des caractéristiques spécifiques. Elles incluent dans la description des usages du sol, la description des systèmes de culture et de leurs facteurs de localisation. Elles auraient pu alimenter des débats comme celui de Charlas en offrant la possibilité de produire des indicateurs mobilisables par les acteurs lors d'un tel débat.

Le débat de Charlas ne portait pas sur les outils mais sur les solutions à mettre en œuvre pour soutenir les débits d'étiage de la Garonne. Ce débat illustre bien la nécessité de gérer conjointement la ressource en eau et les usages du sol dans un territoire. Ce débat autour de la construction d'un barrage pour soutenir les débits d'étiage de la Garonne s'est transformé en une polémique autour des usages agricoles du sol dans le sud-ouest de la France. Les solutions proposées lors de ce débat portaient sur la réduction de la sole de maïs irrigué. L'indicateur qui prédominait dans ce débat est la réduction de la demande en eau à l'échelle régionale. La construction de scénarios portant sur la distribution des usages du sol du









territoire considérée (zone de drainage de la Garonne au niveau d'Agen) aurait alors été appropriée pour faciliter ce débat impliquant une grande gamme d'acteurs du territoire (conseil régional de Midi Pyrénées, Conseil Général de Haute Garonne, Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement de la Garonne, Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, France Nature Environnement, etc.). L'évaluation de ces scénarios à l'aide de modèles calculatoires permettant d'estimer la demande en eau d'irrigation est possible à condition de spatialiser un modèle qui permettrait d'envisager l'hétérogénéité de cette demande sur le territoire.

L'étude de projets mettant en œuvre des scénarios d'usages du sol impliquant conjointement chercheurs (ayant développé des modèles permettant d'estimer des indicateurs) et acteurs (disposant de solutions concrètes au regard de la distribution des usages du sol d'un territoire) est nécessaire à l'élaboration d'une telle approche.


La Figure 5 présente un inventaire des combinaisons de méthodes rencontrées dans la littérature pour caractériser l'état final (distribution envisagée des usages du sol), puis l'impact, dans les scénarios d'usages du sol. Cette figure montre que caractériser l'impact d'un scénario à l'aide d'un modèle calculatoire implique de décrire la situation finale du système de manière quantitative. Elle montre aussi que, pour représenter la situation finale de manière quantitative les approches scénarios ont recours à :


- soit des méthodes calculatoires dont les hypothèses conditionnent la description de la situation finale. Les distributions alternatives ainsi simulées sont donc strictement dépendantes des hypothèses de construction des modèles utilisés. Les modèles calculatoires utilisés se substituent alors aux points de vue de personnes (acteurs, chercheurs ou experts) pour la caractérisation de la distribution alternative des systèmes de culture
- soit, des méthodes narratives, auquel cas les hypothèses de la narration sont formulées par des chercheurs. L'expression narrative (par le discours) de valeurs numériques n'est alors possible que (1) parce que les personnes qui expriment ce discours sont des chercheurs (experts des modèles utilisés) et que (2) ceux-ci possèdent une représentation implicite (schématique et quantitative) du territoire d'étude. Par exemple, Stolte et al. (2005) sont directement capables de traduire le fait qu'une pente forte est une pente supérieure à 15 % car ils ont une bonne vision de la distribution des pentes de leur territoire.


Figure 5: Combinaisons de méthodes pour décrire l'état final du système et les impacts dans les scénarios d'usages du sol


Support pour décrire l'état final du système	Etat final	Impacts	Problème posé	références
narratif				
			La description narrative conduit les constructeurs de ces scénarios à qualifier les impacts de chaque scénario de manière narrative.	Palang et al. (2003) Poux (2006) Mora (2008)
			l'expression narrative de valeurs numériques n'est possible que (1) parce que les personnes qui expriment ce discours sont des experts et que (2) ceux-ci possèdent une représentation formelle (schématique et quantitative) du territoire d'étude.	Wechsung et al. (2000) Stolte et al. (2003) Münier et al. (2004) Van der Werf et al. (2007) Wang et al. (2008)
calculatoire			Les distributions alternatives ainsi simulées sont donc strictement dépendantes des hypothèses de construction des modèles utilisés. Les modèles calculatoires utilisés se substituent alors aux points de vue de personnes (acteurs, chercheurs ou experts) pour la caractérisation de la distribution alternative des systèmes de culture.	Veldkamp (1997) Etienne et al. (2003) Van Meijl et al. (2006) Verburg et al. (2006) Westhoek et al. (2006) Therond et al. (2009) Höll and Andersen (2002) Dockerty et al. (2005) Mourad et al. (2005) Lavigne et al. (2008) Viaud et al. (2008)

Légende

 Méthode narrative produisant de l'information qualitative

 Méthode narrative produisant de l'information quantitative

 Méthode numérique produisant de l'information quantitative

 Élément non défini dans le scénario, pas de méthode mobilisée

Dans la construction et l'évaluation de scénarios d'usages du sol, chaque participant, qu'il soit chercheur, expert ou acteur, peut avoir un point de vue sur une ou des distributions alternatives de systèmes de culture (1) à mettre en œuvre pour atteindre un objectif donné en terme d'impact ou (2) résultant d'un jeu de forces de changements s'exerçant sur le système. Ces points de vue peuvent différer (1) de ceux des chercheurs qui jusqu'ici ont développé des distributions de systèmes de culture de manière narrative et (2) des distributions des systèmes de culture qui seraient simulées par des modèles ou chaînes de modèle pour une évolution des forces de changement donnée ou pour atteindre un objectif donné. Ces personnes peuvent exprimer ces images du futur pour :

- une évolution donnée des forces de changement, par exemple si le prix des céréales augmente ;
- atteindre un objectif donné, par exemple diminuer la demande en eau d'irrigation en juillet ;
- atteindre un objectif donné pour une évolution des forces de changement donnée.

Pour pouvoir évaluer les distributions proposées lors du débat de Charlas il faut permettre à ces personnes d'exprimer la distribution alternative de manière narrative et quantitative. La question qui se pose à nous est : « **Comment permettre de décrire de manière narrative une distribution de système de culture pouvant être évaluée à l'aide de modèles de calcul numérique dans une approche scénario?** »

Pour traiter cette question il faudra répondre à plusieurs sous questions dont la revue bibliographique précédente nous donne déjà quelques éléments de réponse mais soulève également d'autres questionnements :

- Le comment renvoie à la définition d'une méthode pouvant être mobilisée dans une approche scénario pour décrire l'état final de la distribution des systèmes de culture. Comme indiqué précédemment (section I.2.1.1) une méthode comprend des outils, des étapes d'utilisation et des utilisateurs. L'objectif est de ne pas restreindre les utilisateurs potentiels. Plusieurs questions restent tout de même à élucider : Quel outil peut permettre de répondre à ma question ? Et quelles en sont les étapes d'utilisation ? Quelles méthodes dois-je mettre en œuvre pour le développer ?
- Cette question s'inscrit dans une approche scénario, ce qui m'amène à me demander quels autres éléments clefs il faut décrire pour pouvoir répondre à cette question ? Tous les exemples de scénarios d'usages du sol revus qui mobilisent un modèle calculatoire pour caractériser les impacts décrivent la situation initiale de manière quantitative, il faudra donc que je la décrive. Une qui se pose alors est : quelle méthode pour caractériser la situation de référence ? Sachant que mon objectif est d'évaluer les scénarios à l'aide d'un modèle calculatoire il faudra aussi que je me demande quelle base de comparaison je mobiliserai pour comparer les scénarios et comment je restituerai ces scénarios de manière narrative.

Pour traiter cette question, je propose de définir au préalable un territoire d'étude où la question de la distribution des systèmes de culture se pose et un modèle calculant numériquement des indicateurs pertinents par rapport aux enjeux de ce territoire. Je propose ensuite de traiter cette question en trois étapes.

La première étape consistera à construire une situation initiale. Cette situation initiale représentera la distribution des systèmes de cultures en fonction de leurs facteurs de localisation. Cette première étape m'aidera à spécifier les facteurs de localisation et la description des systèmes de culture.

La deuxième étape consistera à développer un outil qui permettra de modifier la distribution des systèmes de culture de la situation initiale en distribution alternative et de traduire cette

distribution alternative en données d'entrée d'un modèle de simulation. C'est dans cette étape que je définirai les étapes d'utilisation de l'outil.

Dans un troisième temps j'utiliserai cet outil pour construire et évaluer des distributions alternatives de systèmes de culture. Cette étape me permettra de définir différentes bases de comparaison des scénarios produits afin de restituer les scénarios de manière narrative.

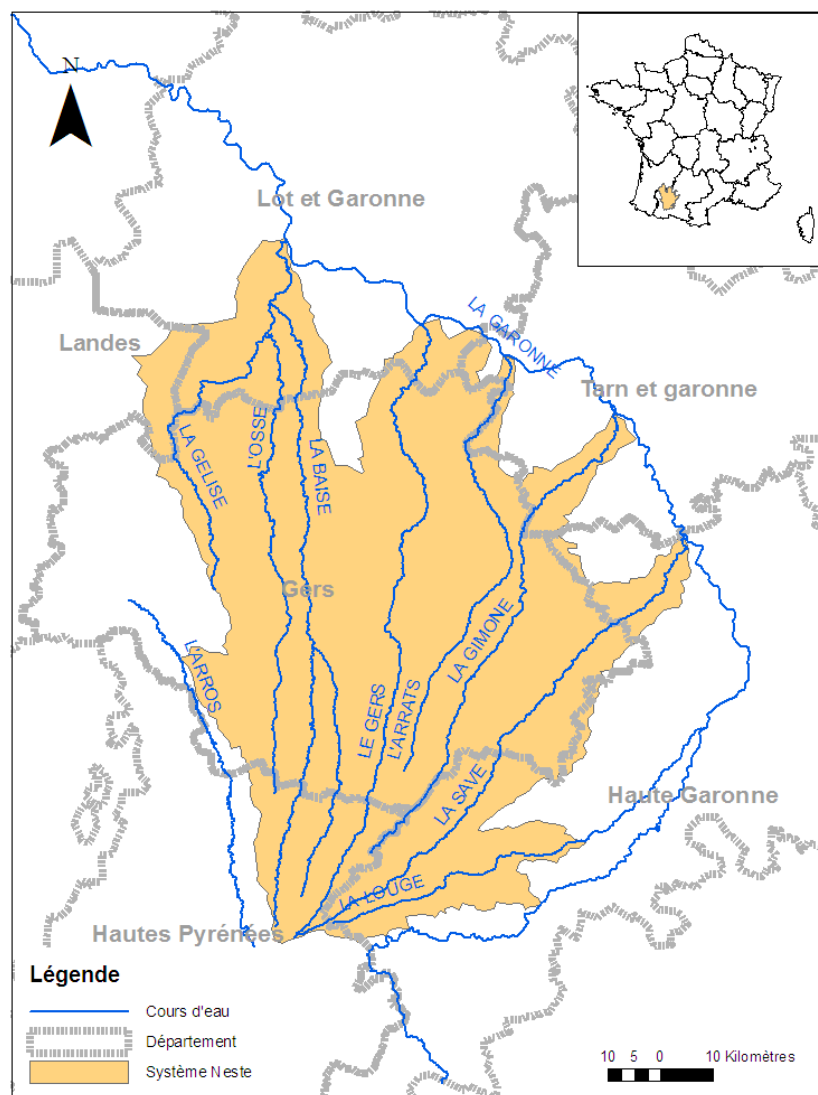
CHAPITRE III. MATERIEL

Dans ce chapitre, je présente le territoire et le modèle de simulation que j'ai sélectionnés pour réaliser ce travail. Dans un premier temps je décris le système Neste, zone que j'ai retenue pour répondre à ma question. Ce choix nous a permis de choisir des indicateurs pour évaluer les impacts de scénarios de systèmes de cultures appliqués à cette zone, et ainsi de définir un modèle de simulation pour les estimer. Dans un deuxième temps, je présente ce modèle et les choix de modélisation que j'ai effectués au préalable pour évaluer les impacts des scénarios construits.

III.1. Le système Neste

Le système Neste (cf. Figure 6) désigne à la fois un réseau hydrographique et le territoire couvert par ce réseau. Géographiquement, le système Neste se situe à 90 % sur Midi-Pyrénées et partiellement sur Aquitaine. Les départements couverts sont principalement le Gers, mais aussi la Haute-Garonne, le Lot-et-Garonne, les Hautes-Pyrénées, le Tarn-et-Garonne et les Landes. Il s'étend du sud du plateau de Lannemezan à la plaine de la Garonne. Cette région abrite 200 000 habitants et sa plus grande ville Auch n'en compte pas 40 000. La zone est peu industrialisée. Le système Neste peut donc être qualifié de territoire rural (Hurand, 2000). En effet les usages agricoles du sol représentent 65 % de sa superficie.

Figure 6 : Le système Neste



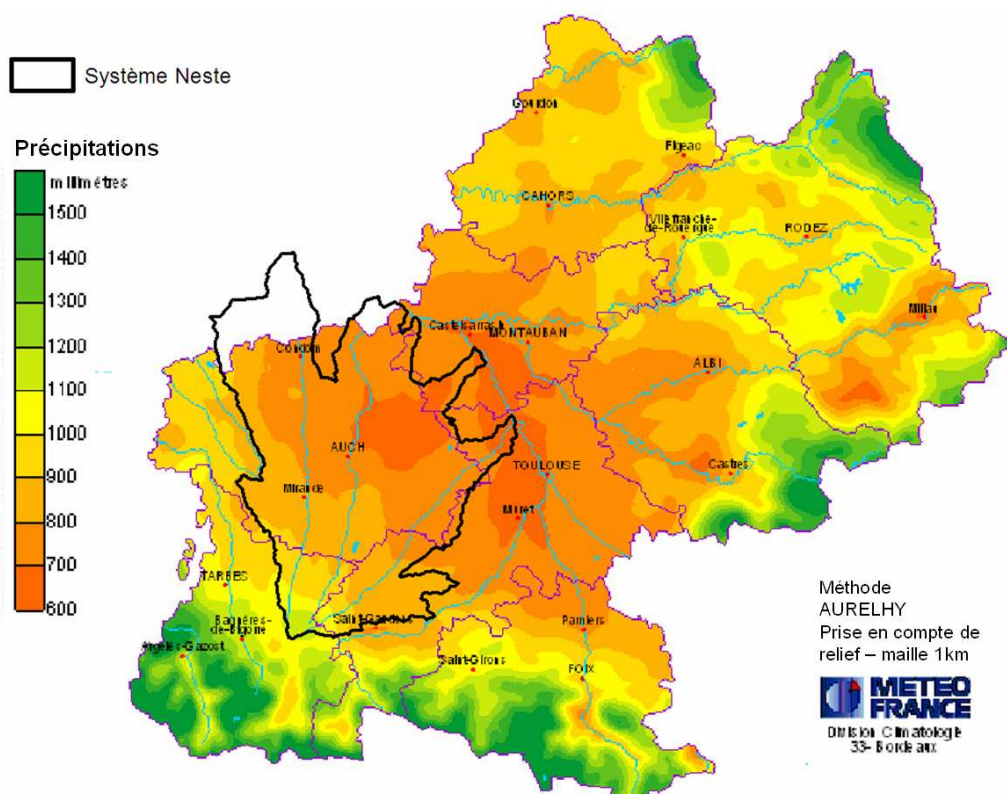
La construction du barrage de Charlas aurait permis non seulement de soutenir les débits d'été de la Garonne, mais aussi d'augmenter la surface irriguée dans ce territoire. En effet, 23 Mm³ de l'eau stockée dans ce barrage auraient été redistribués dans les rivières de ce système par l'intermédiaire d'un canal de transfert d'eau. L'outil que nous projetons de développer aurait alors pu répondre à des question du type : Si la surface irriguée est augmentée, où cette augmentation doit-elle être effectuée.

III.1.1. Le territoire

III.1.1.1. Climat

Le climat du système Neste est influencé à l'est par le climat méditerranéen, à l'ouest par le climat océanique et au sud par la présence des Pyrénées. On y observe donc un gradient climatique aussi bien au niveau des températures que des précipitations (cf. Figure 7). Ce gradient climatique court du sud-ouest, où l'on rencontre les températures les plus faibles et les précipitations les plus fortes (environ 1200 mm/an sur le plateau de Lannemezan), au nord est, où l'on rencontre les températures les plus fortes et les précipitations les plus faibles (entre 600 et 700 mm au nord-ouest d'Auch).

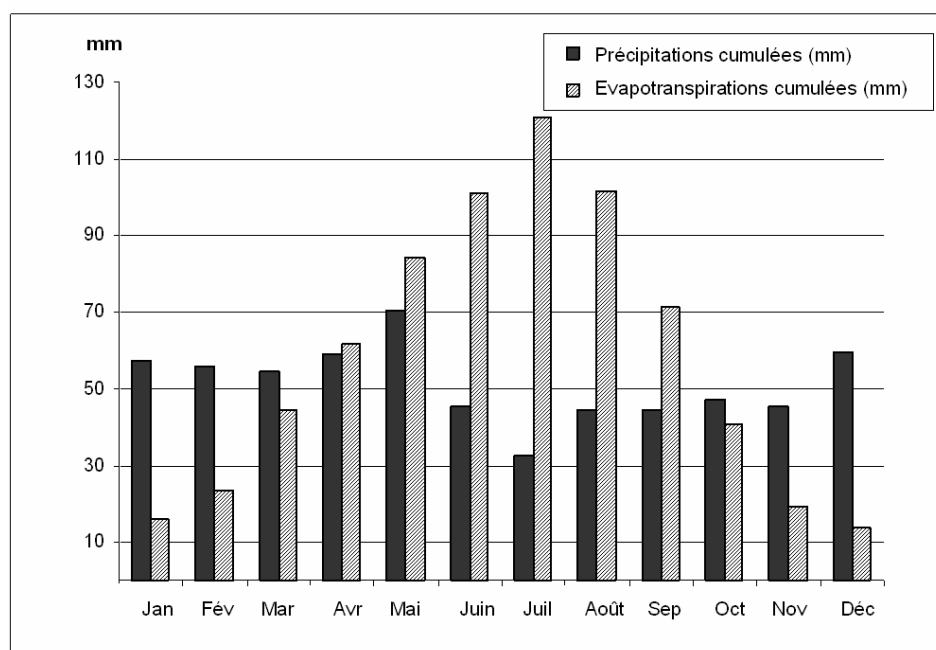
Figure 7 : Cumuls moyens annuel des précipitations en Midi-Pyrénées – période 1971/2000 (d'après Météo France)



Les précipitations subissent aussi une forte variabilité climatique interannuelle. Sur une série de 39 années (1961 – 2000), la pluviométrie annuelle à Auch, au cœur du système Neste, varie entre 556 mm et 995 mm avec une moyenne de 727 mm (Maton, 2006).

Comme le montre la Figure 8, la variabilité climatique est aussi annuelle : la région est marquée par des hivers pluvieux et des étés secs. De mai à octobre, les précipitations sont insuffisantes pour combler l'évapotranspiration.

Figure 8 : Précipitations et évapotranspirations moyennes cumulées mensuellement dans la ville d'Auch (1998-2008)



III.1.1.2. Sols

Le réseau hydrographique dense et orienté nord-sud du système Neste confère à ce territoire une alternance d'est en ouest de sols de coteaux, argilo-calcaires, et de sols d'alluvions.

Localement, on appelle les sols de coteaux « les terreforts ». Les terreforts sont considérés comme fertiles. Ils ont une grande réserve utile et un fort taux d'argile qui permet de limiter les irrigations. Cependant, leur réserve utile varie selon leur pente qui varie de faible à accusée. Plus la pente est accusée plus la réserve hydrique est faible (CRAMP, 1993).

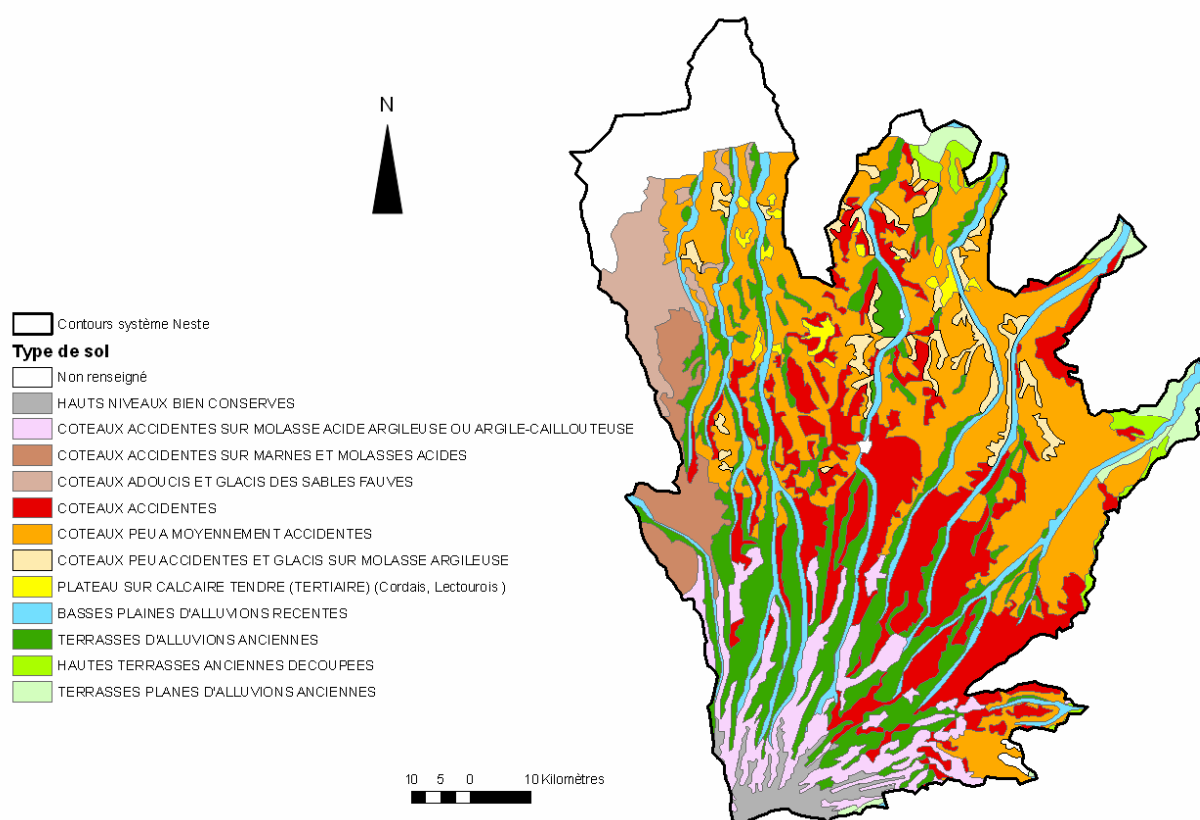
Localement on distingue deux types de sols d'alluvions : les alluvions récentes, appelées « boubènes », et les alluvions anciennes. Les boubènes (ou « boubènes superficielles ») sont des sols limoneux et légers, donc faciles à travailler. Mais elles sont battantes, très hydromorphes et très pauvres chimiquement. La pratique de l'irrigation dans ces sols compense leur faible potentiel agronomique, mais elle nécessite souvent un drainage. Les alluvions anciennes (aussi appelées « boubènes profondes ») se présentent généralement sous

la forme de terrasses. Ces sols limono-argileux ont une grande réserve utile, une bonne capacité de drainage. Leur taux d'argile leur confère un meilleur potentiel agronomique que les bouldiers superficiels.

Par ailleurs, on rencontre des sables fauves dans le nord-ouest du système Neste. Ce sont des dépôts de plages et d'estuaire sableux à argilo sableux. Dans le sud de la zone, on rencontre des dépôts issus de l'érosion des Pyrénées qui forment le plateau de Lannemezan.

L'étude "Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées", réalisée par la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées définit sur la partie midi-pyréennne du système Neste 12 grands ensembles morpho-pédologiques (Figure 9).

Figure 9 : Les grands ensembles morpho-pédologiques du système Neste (CRAMP, 1993)



III.1.1.3. Activités agricoles

D'après le recensement général agricole (Agreste, 2002), le système Neste comprend 9225 exploitations pour une SAU de 523 982 ha. L'assolement de cette zone est principalement constitué de grandes cultures (63 % de la SAU), de prairies et cultures fourragères (19%), de vignes, cultures fruitières et légumières (9 %) et de jachère (9 %) (Soudais, 2008). 4149

exploitations du système Neste (soit 45 %) pratiquent l'irrigation. La surface irriguée en 2000 s'élève à 87 400 ha dont 63 423 ha représentent du maïs irrigué (soit 73 %).

Il existe une diversité de pratiques agricoles au sein de cette zone. Le système Neste s'étend sur 24 Petites régions Agricoles caractérisées par des conditions pédoclimatiques et des systèmes d'exploitation homogènes. Toutefois, Jean Boussaguet de la Chambre d'Agriculture de Haute-Garonne propose un découpage en quatre régions (sud, centre, nord-est et nord-ouest) dont il explique l'homogénéité des systèmes d'exploitation en termes d'OTEX et de pratiques d'irrigation en fonction des caractéristiques pédoclimatiques.

La zone sud est localisée sur les sols du piedmont pyrénéen. Par rapport au reste de la zone, les températures sont fraîches et les précipitations importantes. Les exploitations sont de petite taille, et la main d'œuvre nombreuse. C'est une zone de coteaux, ce qui favorise les systèmes polyculture-élevage.

La zone centre est marquée par un élargissement des vallées en larges terrasses alluviales à faible potentiel agronomique : ces alluvions sont battantes, hydromorphes et se réchauffent lentement. Sur ces terrasses, le faible potentiel agronomique est compensé par une irrigation, facilitée par la proximité de l'eau. On rencontre sur ces terrasses, de grands périmètres irrigués. Les agriculteurs y pratiquent une irrigation qualifiée « de précision » (les apports d'eau sont limités à 25-30 mm et tours d'eau courts : 5-6 jours) car l'hydromorphie rend les excès d'eau pénalisants pour les cultures. Ces grands périmètres irrigués assurent l'alimentation des élevages localisés sur les coteaux.

La zone nord-ouest présente de faibles potentialités agronomiques que les exploitations compensent en se tournant vers l'élevage et l'irrigation. De plus, la forte présence de sables fauves est particulièrement appréciée par les agriculteurs pour la culture de la vigne.

Enfin, la zone nord-est est caractérisée par une dominance de sols argilo-calcaires de coteaux, appelés localement terreforts. Dans cette zone, la main d'œuvre est réduite. Tous ces facteurs justifient une forte présence de petites et moyennes exploitations cultivant de grandes cultures sans les irriguer. En contrepartie dans cette même zone, on rencontre dans la plaine alluviale de la Garonne des terrasses d'alluvions anciennes caillouteuses et donc non-hydromorphes. Sur ces terrasses, l'irrigation est très pratiquée, car simple ; la capacité de drainage de ces sols autorise les excès d'eau.

Afin de caractériser la diversité de ces pratiques nous avons construit une typologie d'exploitation. Cette typologie détermine des groupes d'exploitation ayant un comportement homogène face à des changements en matière de gestion quantitative de ressource en eau (Soudais, 2008). Elle repose sur trois critères identifiés à dire d'expert par M Montgobert

(Chambre régionale d'Agriculture de Midi- Pyrénée), auteur de la typologie d'exploitations SICOMORE¹¹. Les critères retenus (Tableau 5) pour classer les exploitations recensées dans le RGA sont :

- La dimension économique des exploitations en UDE¹² (Unité de Dimension Européenne) : de 8 à 40 UDE¹³, de 40 à 100 UDE, plus de 100 UDE
- Leur OTEX : grandes cultures, polyculture-élevage ou autre¹⁴ :
- Et le ratio surface irriguée sur surface agricole utile (SI/SAU) de l'exploitation pour les exploitations d'OTEX grandes cultures.

Tableau 5 : Les 10 types d'exploitation résultant des critères choisis pour classer les exploitations recensées dans le RGA (Soudais, 2008)

Taille économique (UDE)		8 à 40 = Petite (p)		40 à 100 UDE = Moyenne (m)		Supérieure à 100 UDE = Grande (g)	
SI/SAU		<20 Sec (S)	≥20 Irrigué (I)	<20 Sec (S)	≥20 Irrigué (I)	<20 Sec (S)	≥20 Irrigué (I)
OTEX	Grandes Cultures (GC)	GCpS	GCpI	GCmS	GCmI	GCgS	GCgI
	Polyculture Elevage (PE)	PEp		PEm		PEg	
	Autre (AU)	AU					

Afin de rendre compte de la diversité des exploitations de la zone, nous avons choisi de caractériser chaque type d'exploitation dans chaque Petite région Agricole (PRA) (Figure 10). Il en résulte la description de 240 exploitations types, caractérisées chacune par leur SAU moyenne, la part moyenne de chaque culture au sein de l'assolement, un ou plusieurs types de matériel d'irrigation (Soudais, 2008).

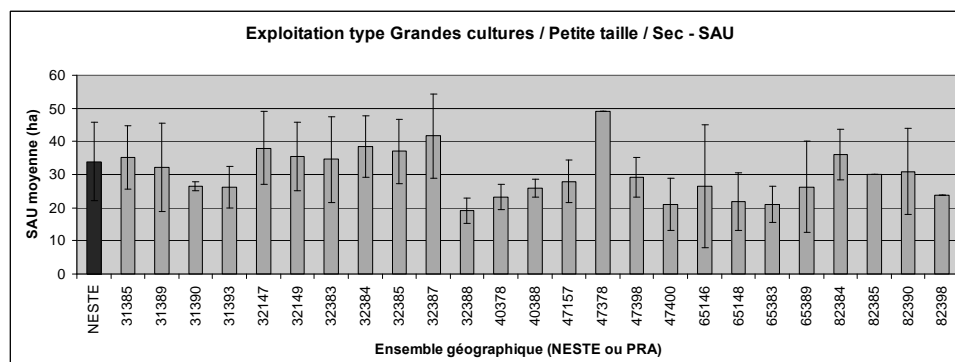
¹¹ http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/economie/sicomore/

¹² L'unité de dimension économique sert au calcul de la marge brute standard des exploitations européennes. Une unité de dimension européenne correspond à 1200 euros ou 1,5 ha équivalent blé (http://drafbretagne.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Dimensionexploitations_cle0f182f-1.pdf; http://ec.europa.eu/agriculture/rica/methodology1_fr.cfm)

¹³ Les exploitations dont la dimension économique est inférieure à 8 UDE n'ont pas été prises en compte dans la typologie elles ne sont pas considérées comme professionnelles dans le RGA.

¹⁴ Les exploitation dont nous caractérisons l'OTEX par autre sont essentiellement des exploitations cultivant des cultures pérennes, il est donc difficile d'imaginer un scénario portant sur ce type d'exploitation précis.

Figure 10 : Variabilité de la SAU des exploitations du type GCpS (Grandes Cultures/ petite taille/ Sec) au sein du système Neste (Soudais, 2008)



III.1.2. Le réseau hydrographique

III.1.2.1. Historique

Le canal de la Neste a été construit entre 1841 et 1862 afin de soutenir les activités économiques de la région drainée par les cours d'eau gascons. De sa prise à Sarrancolin dans la rivière Neste, il court sur une longueur 28 km jusqu'au plateau de Lannemezan pour approvisionner la plupart des cours d'eau gascons qui y prennent leur source. En 1950, la capacité de ce canal est augmentée de 7 m³/s à 14 m³/s et des réservoirs de haute montagne sont mis en service afin de répondre au développement des activités humaines (Beguin et al., 2009).

C'est aujourd'hui la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) qui gère ce réseau hydrographique complexe constitué de 48 Mm³ de réserves de haute montagne, de 52 Mm³ de réserves de coteaux, 1300 km de rivières et 90 km de rigoles pour réalimenter les rivières (Hurand, 2000).

III.1.2.2. Usages

Les principaux usages que doit satisfaire la CACG sont les usages environnementaux et agricoles. La zone est très rurale, elle compte près de 200 000 habitants (soit un débit de pointe de 1,5 m³/s) et quelques industries (soit un débit de pointe de 1m³/s). La demande environnementale se traduit sous la forme de débits réservés à l'étiage en 10 points du réseau hydrographiques. Le gestionnaire doit réserver 5,3 m³/s à ces débits de juin à septembre et 6,8 m³/s de septembre à mai. D'après Hurand (2000), la demande en eau de l'agriculture s'élève en moyenne à 75 Mm³ par an (pouvant dépasser 100 Mm³ en année sèche), volume auquel

viennent s'ajouter les prélèvements des agriculteurs ne prélevant pas dans le système Neste (en tant que réseau hydrographique), mais dans des retenues collinaires individuelles. Cette dernière demande est moins bien connue. Le gestionnaire parvient à satisfaire ces besoins quatre années sur cinq, et comme l'illustre le débat de Charlas, c'est l'irrigation qui est mise en cause.

III.2. Un modèle bio-décisionnel spatialisé

La demande en eau d'irrigation globale sur le système Neste est un indicateur qui prédomine dans le débat de Charlas, son estimation est donc essentielle pour alimenter ce type de débat. En revanche, la réduction de 25000 ha de maïs irrigué n'affecterait que certaines exploitations et certaines parcelles. Des indicateurs à ce type d'échelles pourraient aussi alimenter le débat : selon les points de vue, la solution pour économiser 50 Mm³ d'eau par an peut être que beaucoup d'agriculteurs réduisent un peu leur demande ou que peu d'agriculteurs la réduisent beaucoup. Mon objectif est donc de pouvoir estimer la demande en eau d'irrigation à différentes échelles au sein du système Neste. L'estimation d'autres indicateurs comme les rendements ou le lessivage des nitrates pourraient aussi alimenter le débat. En effet, si l'évaluation de la demande en eau d'irrigation est pertinente pour des acteurs qui mettent en œuvre la gestion quantitative de l'eau et sa planification, elle ne l'est pas pour d'autres porteurs d'enjeux qu'un changement dans la distribution des systèmes de cultures affecterait aussi. Par exemple, la modification de la distribution des systèmes de culture affecte les rendements et par conséquent la production globale de la zone d'étude. Afin de permettre un jugement objectif de l'impact des scénarios construits, nous avons choisi d'utiliser un modèle produisant plusieurs indicateurs mobilisables dans le débat : demande en eau, rendements, pertes azotées etc.

Le modèle bio-décisionnel MOuSTICS¹⁵ associe la version 5 du modèle de culture STICS¹⁶ (Brisson et al., 1998) au modèle d'action de MODERATO (Bergez et al., 2001). Sa spatialisation permet d'estimer ces indicateurs à différentes échelles.

¹⁵ MOuSTICS signifie Moderato Union STICS

¹⁶ STICS signifie Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Culture Standard

III.2.1. Le modèle biophysique

STICS est un modèle générique de culture fonctionnant à l'échelle de la parcelle et à pas de temps journalier. Il simule de manière dynamique la croissance et le développement de la plante et les bilans en eau et azote d'un grand nombre de cultures. Les variables qu'il simule peuvent être utilisées comme des indicateurs agronomiques comme le rendement ou la teneur en protéine et environnementaux comme le taux de nitrates lixiviés ou le drainage profond. Elles peuvent aussi servir de base au calcul d'autres indicateurs. Par exemple des indicateurs économiques comme la marge brute peuvent être calculés à partir des sorties du modèle (rendement) et de ses entrées (intrants).

Des données concernant le sol, le climat, la culture et son itinéraire technique sont nécessaires pour faire tourner le modèle, elles doivent caractériser une situation culturale homogène. Certaines de ces données doivent être fournies au modèle sous forme d'un calendrier. Par exemple, les précipitations comme l'irrigation doivent être fournies au modèle dans un fichier qui associe des dates (en jours juliens) à des apports d'eau (en mm). Il faut donc à chaque situation culturale redéfinir ce calendrier.

Dans STICS, il est aussi possible d'automatiser les apports d'irrigation. Le modèle tient alors compte des besoins de la culture : dès que la plante atteint un seuil de stress hydrique, le modèle apporte une quantité d'eau définie par l'utilisateur. Cette option permet de définir les besoins optimaux d'une culture et non les apports réels d'irrigation mobilisés comme indicateur dans le débat de Charlas. C'est la limite de beaucoup de modèles de cultures qui ne tiennent pas compte de la prise de décision de l'agriculteur (Garcia et al., 2005).

III.2.2. Le modèle décisionnel

Le modèle de décision défini dans MODERATO permet de générer, pour la culture du maïs, ces calendriers d'irrigation, et plus généralement les calendriers d'interventions techniques, en tenant compte des comportements des agriculteurs. Ce modèle présente chaque décision élémentaire sous la forme suivante :

SI [indicateur] [opérateur] [seuil] ALORS [action] [modalité d'action]

Il comporte des règles élémentaires permettant de générer les calendriers de semis, de fertilisation et de récolte. Un corps de 5 règles élémentaires et un jeu de contraintes permettent de générer le calendrier d'irrigation. Le jeu de contraintes définit le contexte de la

parcelle cultivée : volume maximum d'eau disponible, débit maximum disponible etc. Les 5 règles d'irrigation concernent :

- L'apport d'eau pendant la période **semis**-levée
- Le **déclenchement** de la campagne d'irrigation : à quelle date l'agriculteur déclenche-t-il l'irrigation et quel volume d'eau apporte-t-il ?
- Le **retour** de l'irrigation : quelle est la durée d'un tour d'eau, et quel volume d'eau l'agriculteur apporte-t-il à chaque tour d'eau ?
- L'**attente** de l'irrigation : de combien de jours l'agriculteur va-t-il décaler son tour d'eau s'il pleut, et pour quel volume de précipitations ?
- L'**arrêt** de l'irrigation : à quelle date l'agriculteur choisit-il d'arrêter l'irrigation et quel volume d'eau apporte-t-il à cette date ?

En couplant le modèle de décision de MODERATO et le modèle STICS, MO_uSTICS a le potentiel de simuler les règles de décision relatives aux interventions techniques et la croissance de la plante pour une plus grande diversité de cultures. Toutefois cette possibilité suppose d'une part un paramétrage correct de STICS pour les différentes cultures concernées, et d'autre part le paramétrage des règles de décision pour les cultures autres que le maïs.

III.2.3. Paramètres

Effectuer une simulation avec MO_uSTICS nécessite la définition d'un fichier plante comportant un nombre élevé de paramètres à caractériser. Afin de pouvoir effectuer des simulations sur la majorité des cultures, nous avons utilisé un jeu de fichiers dont les paramètres avaient été optimisés au préalable dans le cadre du projet APPEAU pour 7 cultures (correspondant à 61% de la SAU du système Neste). Ces paramètres ont été optimisés pour la version 6 de STICS alors que MO_uSTICS n'utilise que la version 5.

L'utilisation de MO_uSTICS nécessite aussi la définition des règles de décision présentées ci-dessus. C'est à partir d'une revue bibliographique et d'interrogations d'experts que j'ai caractérisé des jeux de règles de décisions pour chaque culture cultivée sur trois types de sols possibles (alluvions, boubènes, terreforts). La construction de ces règles de décision est présentée en Annexe 1. La caractérisation des fichiers sols est présentée en Annexe 2.

III.2.4. Spatialisation

Nous avons vu que le système Neste présente une grande diversité de situations culturelles, que ce soit en termes de cultures, de sols ou de climats. Afin de représenter cette diversité nous avons choisi de spatialiser MO_uSTICS. C'est-à-dire d'effectuer une simulation par situation culturelle (Faivre et al., 2004). L'avantage du choix d'un modèle de décision est que le corps de règles de décision peut n'être défini qu'une fois, c'est la variabilité spatiale du climat qui conditionnera les calendriers d'irrigation résultant de ces règles. Afin de rendre compte de différentes stratégies d'irrigation, ce corps de règles peut aussi être défini plusieurs fois : deux agriculteurs peuvent adopter des stratégies d'irrigation différentes pour la culture d'une même plante. Il faudra alors identifier quel(s) facteur(s) (ex. sol, matériel d'irrigation) influence(nt) la décision des agriculteurs.

CHAPITRE IV. RESULTATS ET APPLICATIONS

Dans ce chapitre je présente l'outil que j'ai développé pour répondre à ma question de recherche. La construction est impossible sans l'identification d'une situation de référence. Je présente cette situation de référence dans la section IV.1. L'outil est une interface qui permet, à partir de la situation de référence, de construire une distribution alternative de systèmes de culture et de l'évaluer à l'aide de MO_uSTICS. Je présente cet outil dans la section IV.2. Dans la section suivante (IV.3) je présente des exemples de scénarios construits à l'aide de cet outil à partir de la situation de référence identifiée au préalable.

IV.1. Caractérisation de la situation de référence

IV.1.1. Résumé en français

La caractérisation de la situation de référence a été l'objet d'un premier article soumis à Land Use Policy.

Cette situation de référence (la distribution initiale des systèmes de culture) va servir à construire des scénarios de distributions alternatives de systèmes de cultures, elle doit donc pouvoir être mobilisée selon différents points de vue

La méthode proposée pour construire cette situation de référence comporte cinq étapes.

L'objectif des trois premières étapes est de proposer un cadre de représentation de la distribution des systèmes de culture au regard des enjeux du territoire étudié. Dans la première étape nous proposons de limiter la description des systèmes de culture à la description des cultures et des règles de décision d'irrigation qui y sont associées. Dans la deuxième étape nous identifions les types de sols et d'exploitations comme facteurs de localisation des cultures et des pratiques d'irrigation associées. Nous décrivons ces facteurs de localisation en utilisant des données administratives du RGA et des données spatialement explicites de la chambre d'agriculture de Midi Pyrénées (cartes de sols). Dans la troisième étape, nous proposons de découper le territoire du système Neste en unité de support résultant d'un croisement entre les unités de gestion du gestionnaire local de l'eau (ces unités sont des sections de bassins versants) et les petites régions agricoles qui sont représentatives d'une homogénéité des pratiques agricoles et du pédoclimat.

L'objectif des quatrième et cinquième étapes est de reconstituer la distribution des systèmes de culture du système Neste, autrement dit, de déterminer dans chaque unité de support quelle est la surface de chaque combinaison type de sol*type d'exploitation*système de culture. La quatrième étape consiste à obtenir une description qualitative des relations entre les systèmes de culture et leurs facteurs de localisation. Le discours recueilli auprès d'un expert (cf.annexe 3) en lui présentant divers supports d'information élaborés dans les étapes 1, 2 et 3 montre que (1) ces informations sont simplifiées par l'expert avant d'être interprétées et que (2) les relations entre les systèmes de cultures et leurs facteurs de localisation sont exprimées de manière très déterministes et fermes pour certaines, et de manière plus floues pour d'autres. La cinquième étape consiste à reconstituer dans chaque unité de support la surface de chaque

combinaison type de sol*type d'exploitation*système de culture. C'est une traduction du discours en données quantitatives stockées dans une base de données. Cette traduction repose sur l'utilisation successive de deux procédures d'allocation. La première procédure consiste en un algorithme déterministe qui permet d'allouer prioritairement des surfaces aux combinaisons type de sol*type d'exploitation*système de culture identifiées fermement par l'expert. La seconde consiste à utiliser la minimisation de l'entropie croisée pour reconstituer l'ensemble des surfaces restantes de manière à satisfaire au mieux une matrice de probabilités d'occurrence des combinaisons définie a priori.

L'ensemble des combinaisons type de sol*type d'exploitation*système de culture de chaque unité de support a ainsi été stockée dans une base de données relationnelle que l'on peut coupler avec un système d'information géographique (représentant les unités de support), permettant la visualisation de la distribution des systèmes de culture selon différentes échelles d'agrégation (unité de support, petite région agricole, unité de gestion) et selon les différents facteurs de localisation. Cette diversité des points de vue offerts à l'utilisateur est destinée à faciliter la construction de scénarios alternatifs de distribution de systèmes de culture.

IV.1.2. Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems

Lucie Clavel ^{a,*}, Julie Soudais ^a, Denis Baudet ^a, Delphine Leenhardt ^a

^a INRA; UMR AGIR; 31320 CASTANET TOLOSAN, France

* Corresponding author

Telephone: (+33) 5 61 28 57 12

Fax: (+33) 5 61 73 55 37

E-mail addresses: lucie.clavel@toulouse.inra.fr (L. Clavel), julie.soudais@toulouse.inra.fr (J. Soudais), denis.baudet@toulouse.inra.fr (D. Baudet), delphine.burger-leenhardt@toulouse.inra.fr (D. Leenhardt)

IV.1.2.1. Abstract

Scenarios are accepted as useful tools for assessing economic and environmental impacts of land use changes, for involving stakeholders in environmental issues and thus for decision making. In most studies involving comparison and evaluation of scenarios, a reference situation is defined in order to develop a reference scenario, which will then serve to compare and evaluate scenarios. When dealing with rural areas, scenarios, and thus reference situation, should not only consider land use but also cropping systems. The usual lack of data concerning cropping system distribution in a given region can be overcome by the use of expert knowledge. In this paper, we present a procedure for the spatial allocation of cropping systems that integrates expert knowledge and quantitative data. The aim of this procedure is to develop a reference situation that makes explicit the link between cropping systems and the factors responsible for their geographical location (location factors).

The procedure consists of five steps: (1) simplifying the description of cropping systems, (2) identifying relevant location factors, (3) dividing the study area into support units, (4) collecting and analysing qualitative expert knowledge and (5) allocating cropping systems by deterministic algorithms and minimisation of cross entropy.

We present an example of the method's application. It concerns the Neste system, a catchment in south-western France where irrigation is a key issue because of scarcity of water. The reference situation is a distribution of the crops and their associated irrigation management. We identified farm types and soils as location factors that can serve for building cropping system distribution scenarios for use in the local debates on irrigation.

Keywords: Scenario; spatial allocation; cropping systems; land use; irrigation; Geographic Information Systems.

IV.1.2.2. Introduction

Land use scenarios are increasingly used for dealing with environmental issues (Alcamo, 2008). They are useful tools for assessing environmental and economical impacts of land use changes (Verburg et al., 2006), for assisting decision making (Jakeman and Letcher, 2003) and for involving stakeholders in land use planning issues (Alcamo, 2001; Alcamo, 2008). A common feature to scenario approaches is the use of a reference scenario. The reference scenario describes the most likely evolution of the system over the time (Pocewicz et al., 2008; Rounsevell et al., 2006) or its evolution resulting from present trends (e.g. Claessens et al., 2009). It usually starts from a reference situation, which describes the present situation (e.g. Palang et al., 2000) or a situation observed in the past. “Policy scenarios” are modifications of the reference scenario arising from surveyed changes (a policy option for instance). Each policy scenario can be compared to the reference scenario, or to another policy scenario, through a panel of indicators evaluating environmental, social or economic impacts.

Building a reference situation is often the first step of scenario approaches. It consists of defining and representing the studied system: the issues, related key variables and scales that are sensible for local stakeholders (Godet, 1991; Mahmoud et al., 2009). In case of land use scenario approaches, the system is generally represented by the main forms of land use and the factors responsible for their location (Bürgi et al., 2004). We call them location factors. The second step is to build scenarios, i.e. alternative states of the system. Quantitative scenarios are usually developed using computer models (Alcamo, 2008, pp. 13-35). For land use scenarios, models are generally based on rules relating forms of land use to driving forces and/or location factors. But scenarios can also be built directly by stakeholders or experts, who then replace models. Alcamo (2008, pp 13-35) state that, in such participatory approaches, the thought processes of the experts are generally neither explicit nor transparent. Nevertheless, like models, experts use rules relating land use forms to driving forces and/or location factors.

Driving factors are variable in time and apply to large extents (Rounsevell et al., 2006). They influence the evolution of cropping system distribution over time. They often depend on politics and economics (e.g. prices, subsidies). Location factors are elements of the studied system that can be considered invariant in time, at least in the short and medium terms. They

are spatially variable and can be mapped. Location factors explain the occurrence of cropping systems at particular sites. As location factors can be used as criteria to move or remove cropping systems in scenarios, they must be specified in the description of the reference situation. Location factors include environmental (or geographical) factors, for instance geological characteristics, soil properties, altitude and slope and distances to rivers or villages (Claessens et al., 2009). They also include technical and economic factors: the location of some cropping systems can be explained because they are part of a farm which has some particular characteristics (a technical or economic specialism, a particular item of machinery, etc) (Maton et al., 2007). Weather variables can be considered either as location factors (Verburg et al., 2006) or as driving factors (De Silva et al., 2007).

Relationships between land use forms and their location factors may be identified in order to build the reference scenario by using georeferenced databases. For instance, Claessens et al. (2009) use geo-referenced digitized aerial photographs. When georeferenced data is unavailable this task is often restricted to studying existing correlations between land use forms and location factors (Bürgi et al., 2004). Another way to characterise these relationships is to collect a narrative description based on logical reasoning, which uses some qualitative location factor to justify the occurrence or suitability of a given type of land use (Bürgi et al. 2004). The combination of quantitative geo-referenced data and qualitative relations is often the solution when observed data are absent (e.g. Mignolet et al., 2004).

In agricultural areas, environmental key issues are related not only to the agricultural cover (i.e. the crops) but also to agricultural practices (e.g. irrigation, fertilisation), that is, to the cropping systems. A cropping system is defined by the crop succession and the management systems associated to each crop (Sebillotte, 1990). A cropping system has a temporal coherence, in that the crop management system corresponds to a logical and coordinated succession of actions (Meynard et al., 2001). For example, the management system of a crop depends on the preceding crop. A cropping system also presents a spatial coherence, which results from logic and decision processes applicable to areas greater than a single field (Jouve, 2007). This concept of a cropping system explicitly considers both crops and their management systems and suggests that a crop is not always associated with the same crop management system. It is particularly suited to studying environmental problems affected by agricultural management practices (Leenhardt et al., 2009).

Building a reference scenario that explicitly considers cropping system distribution faces the problem of characterising the relationships between the cropping systems and their location factors. Detecting correlations by statistical approaches is often more difficult than for land

use scenarios because cropping system information on large areas is often lacking (Leenhardt et al., 2009). To overcome this lack of data, one solution is to turn to experts for specifying such relationships to complement existing data (e.g. Mignolet et al., 2004). Another solution is to assume that relations between characteristics of cropping systems and location factors (soil and climate) are due to farmers' attempts to maximise profit. Therefore a farm model can be used to establish these relations (Reidsma et al., 2006).

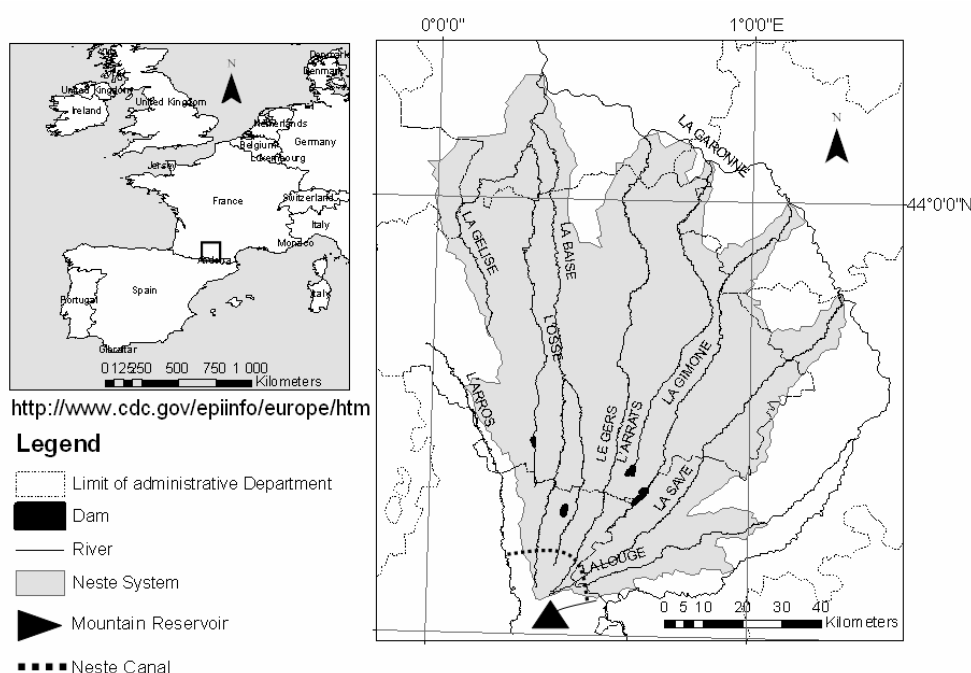
In this paper we present a new allocation procedure that integrates qualitative and quantitative information for characterising links between cropping systems and their location factors. We first present the study area, the available data and the main steps of the spatial allocation procedure. Then the results section describes the relationships between cropping systems and location factors obtained from the interviewed expert, and the implementation of the spatial allocation procedure on the study area. Finally we discuss the proposed method with regard to our results.

IV.1.2.3. Material and methods

Study area

The study area corresponds to a water management area called the “Neste system”. This 8 000 km² hydrographic catchment is equidistant from the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. It extends from 43 to 44° N and from 0 to 1° E over the region known as “Gascogne”.

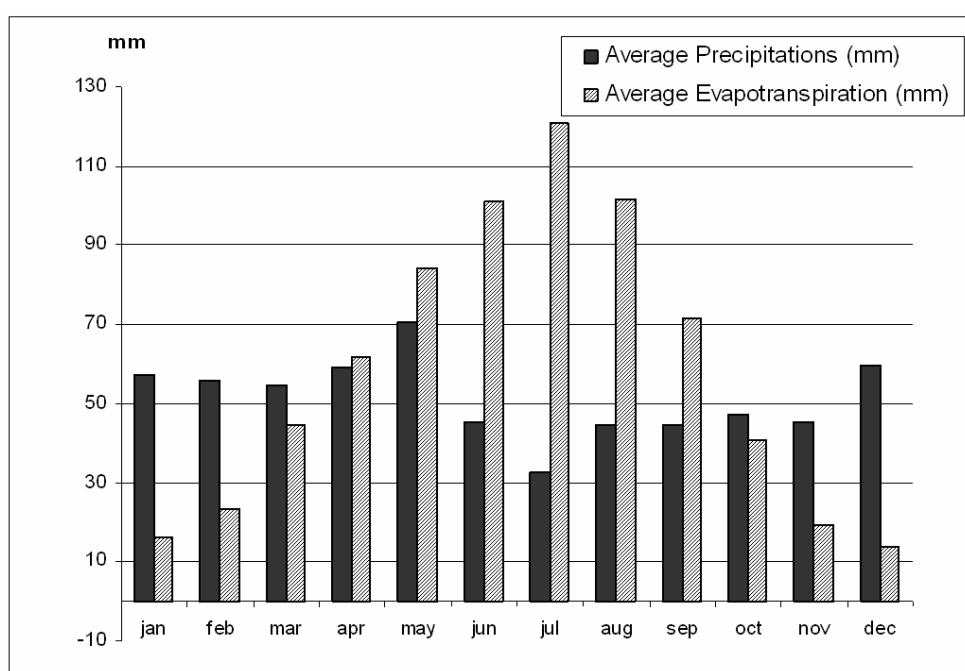
Figure 11: The Neste System



The area contains three main groups of soils. The first, locally called “Boulbènes”, includes the hydromorphic loamy soils present in large valleys to the south. The second includes the calcareous clay soils, locally called “Terreforts”, encountered mainly in the northern, hillier part. The third group includes the high-yielding old alluvial soils found in the valley of the river Garonne. Some minority soils cannot be classified into these three groups, mainly because of their highly variable characteristics.

The main annual crops are durum wheat, soft wheat, winter rape, spring pea, maize, sunflower, and soybean. Almost 525,000 ha are cultivated. More than 80,000 ha of arable land are irrigated by about 4000 farmers (Agreste, 2000). 60 000 ha of those are irrigated maize, which is grown as an end-product for the animal feed and starch industries, or for on-farm use (poultry or cattle feed). Livestock farms (cattle production) are mainly found in the upstream part of the watershed while field crops are mostly grown in the downstream part. Poultry farms are also present in the region.

Figure 12: Average monthly precipitation and evapotranspiration in Auch (43°39'0" N, 0°35'0" E)



Regarding water resources, the Gascogne region is naturally deficient, for two reasons. The first is that the region experiences an evaporative deficit from April to September on average (Figure 12). Rainfall is low, but also extremely irregular both from year to year and from month to month in summer. The second reason is that the Gascony rivers, that drain a vast glacial alluvial cone, disconnected from the Pyrenees, do not benefit from the melting of high mountain snow. In order to mitigate this natural disadvantage, a water distribution system, called the “Neste system”, has been developed over the years. The Neste Canal, constructed in

1862, diverts water from mountain reservoirs (54.8 Mm^3 being dedicated for agricultural use) into the 18 Gascony rivers, used as natural channels. In addition, hilly reservoirs (with a present capacity of more than 44 Mm^3), located at the head of these rivers, have been successively built between 1967 and 1991. Filled during winter, they complement the system's resources. Most farmers can therefore get water from the artificially recharged rivers, either directly or from a pressurised irrigation network.

Thanks to the Neste system, but also to European Common Agricultural Policy, the irrigated area has been increased about threefold since the 70s. Nowadays the system faces a lack of water about two years out of ten that threatens the environmental equilibrium of the rivers and the ability to provide adequate water for agricultural needs.

The project of building a 110 Mm^3 reservoir (the Charlas dam) to support natural flows of the Garonne and its tributaries led to a public debate that caught the attention of the whole of south-western France about agriculture issues (Mandement, 2004). Proponents of the project argued that the dam could both sustain natural flows and increase the water supply for other uses such as irrigation within the Neste system. Opponents argued for a reduction of 15% in the irrigated area in order to restrict water deficits. Irrigated agriculture thus became central to the debate, but no analysis of alternative agricultural scenarios was made during this debate.

Available data

Several sets of data are available to describe the Neste system in terms of environment and agricultural activities. A soil geographical database results from the synthesis of 2 different soil surveys (unpublished soil surveys from IGCS, 2000; and Penalver and Longueval, 2008), each of them describing partly and differently the Neste system (the first describes 19 soil units and the second only 12). We used these two soil information sources to build a soil database that describes the whole Neste system. It classifies the soil in 12 units that are representative of the main soil heterogeneity pattern. Each unit is associated with one soil profile whose physical and chemical properties have been averaged from measurements made during the IGCS survey, and with averaged soil characteristics (e.g. depth, soil available water capacity).

The characteristics of agricultural activities of the Neste system are described by means of the last national agricultural census data conducted in year 2000 (Agreste, 2000). It concerns every French farmer and states for each farm the areas cultivated with each crop, the irrigated areas and other economic data (Agreste, 2000). Each farm is associated with the municipality where it is located. The censured farms of the whole Neste system were classified into ten

types according to economic factors (i.e. the Standard Gross Margin of crop or livestock item expressed in European Size Units¹⁷), specialisation and irrigated area (Table 1). Farm types were described per small agricultural region by their average agricultural area and the average area occupied by each crop (Soudais, 2008, unpublished work).

Table 1: The ten farm types of the Neste system (from Soudais, 2008, unpublished work)

Economic size (ESU*)	Irrigation rate (%)**	Technical Orientation		
		Field Crops	Mixed crops Livestock	Other
8 to 40	<20	Field Crops Small Rainfed	Mixed crops Livestock	
	>20	Field Crops Small Irrigated	Small	
40 to 100	<20	Field Crops Medium Rainfed	Mixed crops Livestock	
	>20	Field Crops Medium Irrigated	Medium	Other
> 100	<20	Field Crops Large Rainfed	Mixed crops Livestock	
	>20	Field Crops Large Irrigated	Large	

* The concept of Standard Gross Margin is used by the European Union to determine the economic size of farms, which is expressed in European Size Units (ESU): 1 ESU = 1200 euros.

**Irrigation rate = Irrigated area (ha) * 100 / Agricultural area (ha)

Spatial allocation procedure

The method we followed for mapping the cropping systems of the Neste system includes five main steps: (1) the simplification of the cropping systems according to the main aspects that are significant regarding the study area and the studied issue, (2) the identification of the variables that can be considered as potential location factors, and their specification, (3) the division of the studied area into support units, (4) the collection of complementary qualitative information, allowing to establish the link between cropping systems and their location factors, and (5) the analysis of this qualitative information to define the process for allocating cropping systems in space. We will now elaborate on these five steps.

Step 1: Simplifying cropping system description

A difficulty in representing the system is to find a sound balance between generalisation and specification, e.g. between accounting for the diversity of cropping systems and simplifying it

¹⁷ http://ec.europa.eu/agriculture/rca/methodology1_en.cfm

in relation to the considered issues (Baudry,1996; Bürgi et al., 2004; Maton 2006). The main issue of the Neste system concerns water use, and particularly irrigation demand. This is why we decided to limit the description of cropping systems to the elements that have a significant impact on irrigation demand. Maton (2006) identified three main elements in continuous irrigated maize systems: irrigation, sowing date and cultivar earliness. Since in the present work we considered all crops, we restricted the cropping system description to the crops and the associated irrigation practices. We described irrigation practices for each crop by a set of five irrigation rules: sowing, triggering, returning, delaying and stopping (Bergez et al., 2001). The great diversity of possible crop successions made it difficult to account for the crop succession. Besides, in the Neste system, soil reservoirs are generally filled during winter. The crop water need is thus independent from the preceding crop. Furthermore, it is assumed that the regional crop acreage reflects the diversity of crop successions. For all these reasons, we decided to summarise the cropping systems by the crop-irrigation management combinations.

Step 2: Identification and specification of location factors

In a given area (e.g. a catchment), the agricultural land can then be viewed as a mosaic of cropping systems. The spatial distribution of cropping systems can be explained by two groups of location factors: environmental factors, also called site factors by Bürgi et al. (2004), and technico-economic factors. We selected soils as environmental factors and farm types as technico-economic factors of cropping systems location. Soils are described by their types and by specific quantitative properties that may explain irrigation practices (e.g. available water content). Soil types can be associated with landscape features such as slope, distance to river that also influence agricultural practices. Farm types include the description of crops and technical properties, such as irrigation equipment or arable area, which can be related to irrigation practices and crop choices. Information related to farm types and to soils were input into a geographical information system as independent information layers.

Step3: Definition of support units

The study area was divided into several support units, chosen with regard to the objective of building a reference situation for cropping system scenario development. We defined support units we thought would be meaningful for a large number of stakeholders in order to encourage their involvement in the construction of scenarios. These support units correspond to the intersection of two pre-existing divisions: the water management units used by the local water manager who operates the Neste canal (longitudinal sections of rivers' catchment

areas), and the small agricultural regions (representing areas uniform in terms of soil, climate and agricultural practices). Water management units convey some hydromorphic and topographic conditions and some constraints regarding access to water. Small agricultural regions, although defined in 1946, are still used as a spatial basis for statistics regarding agricultural activities and well represent uniform farming zones (Mignolet et al., 2004). The mapping was done using GIS software, and resulted in 67 SUs, with a mean area of 10 000 ha.

The support units were characterised in terms of soil types and farm types. The proportion of each soil within each support unit was calculated by overlaying the soil map with support unit contours. The agricultural area of a particular farm type per support unit was calculated as the sum of the agricultural area of censored farms of this type within this support unit. We thus know the relative area of each farm within each unit but we are unable to locate them more precisely.

Step 4: Collect of qualitative information

Qualitative information was required for establishing the relations between cropping systems and their location factors. The soil information layer gives a unique correspondence between one geographical location and one soil type. The farm typology gives a deterministic relationship between crops and farm types. But the farm information layer only specifies the areas of the different farm types that coexist in each support unit. Therefore, it is not possible to establish the different combinations of crops, farms and soils. Furthermore no information about irrigation practices, except for irrigation equipment and irrigated area per crop, was available from the farm data.

As our purpose in this study was to demonstrate the feasibility of our allocation method, we collected the lacking information from a unique expert: an irrigation adviser from farm local extension services.

To facilitate the expression of his point of view about cropping system distributions with regard to soils and farm types, we provided him with all the information we had on soils and farm types, through several kinds of maps: the distributions of crops and farm types at three different levels (Small Agricultural Regions, management units and support units) and the soil maps corresponding to the two source soil surveys. We also gave him a presentation of the different farm types (Table 1) and a description of the different soil units (quantitative soil properties, and qualitative elements such as slope expressed as high or low). We then asked

him to formalise his knowledge of the spatial distribution of crops and irrigation practices in relation with farm types and soils.

Step 5: Spatial allocation of cropping systems

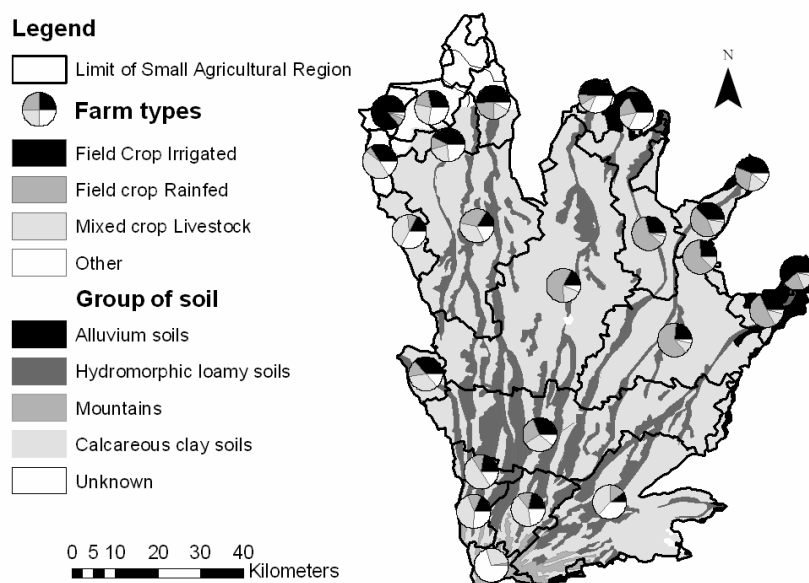
To implement the relationships described qualitatively by the interviewee, we first evaluated, from his account, which relationships seemed firm and which were vague. We translated the firm relations by “If-then” deterministic rules and applied them in priority. For the fuzzier relations, we applied the minimization of the cross entropy, a statistical method that can be used to estimate under-identified models, i.e. for which the number of parameters to be estimated is greater than the number of observations (Golan et al., 1996). The cross entropy is an informational distance between two distributions of probabilities. Minimizing the cross entropy between an a priori and an intended distribution allows estimating the distribution the closest to the a priori distribution. Entropy approaches have often been used by economists for disaggregating the agricultural production e.g. (Howitt and Reynaud, 2003; You and Wood, 2006). We used it here to allocate farms to soils according to statements that were not taken into account in the deterministic allocation step.

IV.1.2.4. Results

Qualitative relationships between cropping systems and location factors

In order to describe the distribution of cropping systems over the Neste system area, the interviewee, whom we shall call the “expert”, first checked the consistency of all the information we provided to him (quantitative descriptions of farm types and soil units). He then used only part of this information, using the simplest soil map (i.e. with the fewest soil units and lowest resolution) and the map showing the distribution of farm types per support unit. Furthermore, he simplified this information. He did neither distinguish as many soil classes as presented, nor as many farm types as were distinguished by the farm typology. He grouped all soil units into the three main soil types that are usually identified over the region: one class for the two hydromorphic loamy soil units, one class of calcareous clay soils grouping the seven soil units with steep slopes, and one “alluvium” class corresponding to the two soil types with low hydromorphy. For farm types, he very rarely distinguished the types that differed only in their economic size. He considered just four farm types: Field Crops Irrigated, Field Crops Rainfed, mixed Crop Livestock and Other. Figure 13 presents a map overlaying the distribution of these four farm types over Small Agricultural Regions and the map representing the three soil classes he mentioned.

Figure 13: Farm types distribution within Small Agricultural regions and main soils



The relationships between cropping systems and location factors expressed firmly by the expert are two. The first is that Field Crops Irrigated farm types, and particularly large and medium Field crops Irrigated farm types (note that this was the only time the expert mentioned the farm economic size) are to be found on alluvial soils. The reason is that such soils, with a good drainage capacity and a large available water capacity, are suitable for irrigation, even if water is applied in excess or too frequently. The second is that farmers have to practice an “accurate” irrigation, that is supplying a small amount of water frequently, on hydromorphic loamy soils because of their poor drainage capacity.

The other relationships expressed by the expert appeared more vague. On the one hand he said that the poor agronomic properties of hydromorphic loamy soils meant that irrigation added a lot of value to crop returns. But on the other hand he said that it was common to find both Field Crops Irrigated, and Field Crops Rainfed farms on such soils. He mentioned that Crop Livestock farms were usually located on hilly areas (i.e. calcareous clay soils) because irrigated crops were given priority on alluvial and clay hydromorphic soils. If Rainfed Field Crops farms and Crops Livestocks coexist on hilly soils, the Livestock are kept on the steepest slopes.

He also provided some more vague relationships about irrigation practices and their relationships with the soil. For example alluvial soil properties provide flexibility to the farmer regarding irrigation: consequently, the duration between two water applications and the amount for one water application he specified (see the maize example in the Table 2) are average values and some farmers apply much more water without adversely affecting their yield. On calcareous clay soils, slopes make it difficult to irrigate, while the relatively high

percentage of clay (i.e. from 23 to 40%) confers a high field capacity, and therefore high available water content. Consequently, mainly rainfed crops are found on these soils. However, some farmers still practice irrigation with a long but variable duration between two water applications (more than 12 days for maize) and large water amounts (more than 40 mm for maize). Table 2 provides a summary of the expert's statements. For the stake of simplicity, we have only mentioned the irrigation management for the maize crop because maize is the main crop of the area. But irrigation management for soybean and sorghum was also specified by the expert, with a similar variation between the 3 soil groups. In total, 11 cropping systems, defined as crop-irrigation management combinations, were identified: 4 irrigated systems (maize, sorghum, soybean and sunflower) and 7 dry systems (durum wheat, maize, oilseed rape, sorghum, soybean, sunflower and wheat).

Table 2: Relations between soils, farm types and maize irrigation management obtained by expertise

Soil types	Hydromorphic loamy soils	Calcareous soils	clay	Alluvium soils
Main soil characteristics				
Agronomical potential	Low, very hydromorphic	Good, clayey Large		Very good, good drainage
Water reserve	Low			Large
Topography	Flat	Slopes		Flat
Geographical position	Close to the rivers	Far to the river		Close to the river
Main patterns of irrigation				
Duration of irrigation round	Short (6 days)	Long (>10 days)		Short (<8 days)
Water amount per round	Small (25 mm)	Large (>35 mm)		Small (<35 mm)
Main observed farm type				
	Field Irrigated Mixed Livestock	Crops Crops	Field Rainfed	Crops Irrigated

Implementation of the spatial allocation procedure

The procedure for allocating cropping systems in space included: 1) the allocation of farms to soils, 2) the determination of crop acreage per farm and soil, and 3) the attribution of an irrigation management to each crop-soil combination.

Allocation of farms to soils

A deterministic algorithm was used to allocate first Large Field Crop Irrigated Farms and then Medium Field Crops Irrigated Farms to alluvial soils provided that these soils had vacant area. To allocate the rest of the farms to the rest of the soils, the number of possibilities is great because the relations established by the expert can be regarded as vague. Thus we interpreted his account to assign a weight to each farm-soil combination. We then used these weights to build a priori matrix needed by the entropy approach (Table 3). By minimising the cross entropy, we then determined the areas of each unidentified farm-soil combination.

Table 3: Summary of the a priori matrix used for minimising the cross entropy (The actual matrix details the probabilities for the 10 farm types and 12 soil types)

Farm type	Alluvium soils	Hydromorphic loamy soils	Calcareous clay soils
FCR	0	0.1	0.9
FCI	Not concerned	1	0
CL	0.15	0.2	0.65
O	0.98	0.02	0

Determination of crop acreage per farm and per soil

The crop acreage per farm type is provided directly by the farm typology: The average useable area of each farm type and the proportion of each cultivated crop (distinguishing irrigated and rainfed crops) are specified. Knowing the area of each farm-soil combination, we get the area of each crop-soil combination.

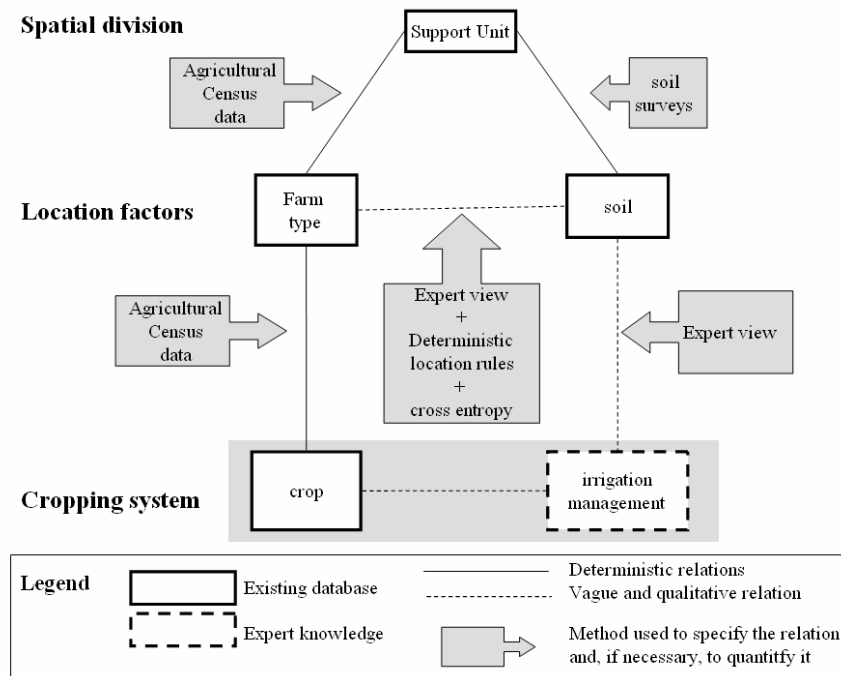
Attribution of irrigation management to crop-soil combinations

We assigned to each crop-soil combination a set of irrigation management practices describing the water amount applied at each irrigation and the time between two irrigations. The values we set for these variables are constant (the average values provided by the expert) even if the expert said that they varied.

This procedure, summarised in Figure 14, was implemented for each support unit. It allowed us to determine for each support unit the area associated with the 1320 combinations resulting from the 12 soil types, 10 farm types and 11 cropping systems. This information was stored in a relational database, and could therefore be visualised using GIS software, according to different criteria (per soil, per farm type, etc.) and different levels of aggregation (support

units, Small Agricultural Regions, whole Neste system) to match different stakeholder points of view (Cinderby, 1999; Etienne et al., 2003).

Figure 14: The followed methodology



IV. 1.2.5. Discussion

The discussion here deals with the method developed, and not on the results that are specific to the studied case. We discuss first the advantages and drawbacks of using expert knowledge: (1) how we dealt with the problem of getting vague qualitative information from the expert while needing quantitative information for modelling and (2) the fact that we involved only one expert. Then we discuss the generic character of the procedure we developed, and the difficulty in validating it.

Use of expert knowledge

Using expert knowledge has several advantages. First, it provides information where data is missing. For example, here, information about the duration of the irrigation round or the water amount applied at each irrigation is very difficult to estimate for each soil type. In France, these two variables are available only from the cultural practices survey (SCEES, 2004), but the sampling scheme of this survey does not allow any estimation at a resolution below the district (French “Department”). Second, expert knowledge can also provide, as shown in the present study, elaborated information: not only variables, but relations between variables either in a formalised way (a typology) or not (a qualitative view). This elaborated

information can confer more credibility to the final scheme. Such credibility is necessary if the final product is to be used with stakeholders.

Using expert knowledge also presents drawbacks. The kind of information depends on the person who provides it, his own perception of the study area, his memory and his capacity for synthesis (Mignolet et al., 2004; Becu, 2006). The information given is often a simplified perception of the study area: it allows objects or categories to be identified that are a representative but approximate view of the reality (Clavel et al., 2008). In our study, when the expert described soils and farms, he reduced their diversity to 3 classes from 12 and 4 classes from 10 respectively. Another drawback is that information is delivered in a qualitative way. It must then be interpreted when quantified data is needed, e.g. for using a simulation model. This conversion problem is highlighted by Alcamo (2008, p123-149), and called the “defuzzification” problem.

In our study, the procedure for translating the expert’s statements into data suitable for running the simulation model included: (i) the attribution of quantitative value to variables, (ii) the classification of the expert’s statements and (iii) the choice of particular methods for spatial allocation. These three tasks depend on the researcher(s) who conducted the whole process.

In our study case, the first task concerned for instance the specification of irrigation decision rules: the researcher had to specify, from the expert’s account, a value for the periodicity of the irrigation round and the amount of water applied per round. It also concerned the proportion of each farm type on each soil: it was required to build the a priori matrix for applying the cross-entropy method, but was not clearly expressed by the expert. Thus, this step included some subjectivity from the researcher. In the present study, we ourselves quantified the expert’s view. To improve the method it could have been useful to come back to the expert and build with him this a priori matrix, or at least, to better formalise our conversion process to make it more easily reproducible.

The second task was to classify the expert’s statements into two classes: the firm ones, and those that were expressed less assuredly. Depending on the expert, this task may be more or less easy, needing some subjectivity from the researcher. In our study, some statements were confidently asserted, so that this classification was easy.

The third task was to use successively a deterministic algorithm and the minimisation of cross entropy to account for firm and fuzzier statements in the proposed spatial allocation of the cropping system procedure. The cross entropy has the advantage to value the expert knowledge through this a priori distribution of probabilities of occurrence of farms on soils,

despite the fact that the fuzzy wording of the expert has to be translated into quantified weights. Combining a deterministic algorithm and cross entropy minimization allowed us to minimize the amount of subjectivity introduced by the researcher. Indeed, using only deterministic algorithms would have led us to introduce some priority rules into the spatial allocation procedure that had not been expressed by the expert. Conversely, using only cross entropy would not have allowed the clear relations between farms and soils to be expressed, as asserted by the expert.

We involved only one expert in the process of building the reference scenario. The reason was the illustrative character of our study for integrating expert knowledge and quantitative data into mapping cropping systems. It is however commonly accepted that more than one expert and/or stakeholder should be involved to get a shared and relevant representation of a system (here a cropping systems map) (Mermet, 1991). A collective approach would have led participants to share their points of view and would have ensured that the collectively built reference scenario was accepted by all of them (Becu, 2006; Le Bars and Le Grusse, 2008). Nevertheless, conducting the proposed procedure with several experts or stakeholders raises several questions: who should be involved? How and when to involve them? How to manage the collective process?

Even when the aim is to obtain a representation of cropping system distribution shared by various stakeholders, the use of this procedure in an individual way also has some advantages. Conducting the procedure individually with different stakeholders and/or experts may highlight the diversity of their points of view about cropping system distribution in a given area. It avoids the inhibition of some stakeholders faced with charismatic personalities that may occur in collective meetings (Koehler, 2008). It can also facilitate the next step of the scenario approach, i.e. the construction of alternative scenarios of cropping system distributions. Indeed, according to (Nuseibeh et al., 1994), various stakeholders may have different representations of the same system. Therefore, the scenario approach may be facilitated if the person involved in the alternative scenario construction has built the reference scenario himself.

Validation and general character of the proposed procedure

The reference scenario obtained by the spatial allocation procedure is a picture of the distribution of cropping systems over the Neste system in year 2000. It specifies the spatial distribution of cropping systems and specifies, for each support unit, with which soil and farm

type each cropping system is associated. The cropping system is characterised by the crop and the irrigation management.

The accuracy of the picture obtained can be questioned. Indeed, the procedure we applied did not take into account the fact that one farm can be spread over two or more soil types. In reality, a farmer whose farm covers two different soils allocates his crops according to the soils. Similarly, the procedure did not adapt the crop acreage of a farm according to the soil to which it has been allocated, although two farms of the same type located on two different soils would probably have different crop acreages. The effect of introducing a more realistic allocation procedure should be evaluated. This point raises the problem of validation of the proposed method.

For implementing this allocation procedure over the Neste system area, we used all easily available data. Consequently, we did not have a supplementary dataset to validate this procedure by a classical observed-estimated comparison. Another way to evaluate the cropping system distribution obtained would be to check if some indicator calculated from this distribution is consistent with observed values of this indicator. We calculated the irrigation demand for the distribution of cropping systems described by the reference scenario, and compared it to two measures of irrigation water demand (measures of irrigation water demand are monitored both by the Water Agency and the local water supplier). These results have not been reported here because this evaluation method is also questionable. Indeed, the drawback of the method is that the comparison integrates not only the error due to the method for building the reference scenario but also errors associated with the method used to calculate the irrigation demand indicator and measurement errors of water consumption. If we are not able to evaluate these last two kinds of error, we cannot evaluate the error due to the allocation procedure itself. However, this kind of comparison allows the consistency of the reference scenario to be checked, which can be sufficient when the reference scenario is to be compared to alternative scenarios, particularly when dealing with large areas such as the Neste system.

The spatial allocation procedure we developed here combines deterministic algorithms and a Bayesian method. This can account for firm and fuzzier statements expressed by experts. This combination of techniques has been applied here for distributing cropping systems over a large area, but it could be used for distributing any other activity or object over any kind of area, with any kind of support units (e.g. homogeneous cells, Small Agricultural regions, Neste system) and for different areas (e.g. Small Agricultural region or the whole Neste system).

IV.1.2.6. Conclusion and prospects

In this paper we have argued that reference scenarios that deal with agricultural areas must have specific properties: they must represent not only land use but cropping systems and their location factors. As data about cropping system distributions is often partial, we proposed to develop a method that integrates expert knowledge and quantitative data in mapping cropping systems.

The proposed method consists of (1) asking an expert to express his view regarding the relationships between cropping systems and their location factors (2) identifying firm and fuzzier assertions from this account; and (3) allocating cropping systems by using successive deterministic algorithms (for firm assertions) and cross entropy (for the fuzzier ones).

The reference scenario developed by the method presented in this article is intended to be used not only as a basis for scenario comparisons but also as a support for the construction of these alternative scenarios. This is why we made sure that the reference scenario clarified the links between cropping systems and their location factors: the latter can be used by stakeholders as levers to re-distribute cropping systems in an alternative scenario. The diversity of location factors included in the reference scenario makes it usable with a large panel of stakeholders, with different points of view. For example, the group of stakeholders with an environmental point of view may suggest removing maize where it uses a large amount of water, while a group with an economic point of view might suggest removing maize from farms better able to manage without it, or from farms that benefit from specific subsidies.

Further work is envisaged to build and evaluate alternative scenarios of cropping system distributions with various stakeholders using the reference scenario presented.

IV.1.2.7. Acknowledgments

The present study is part of the APPEAU project, funded by the French National Research Agency (ANR) as part of the Agriculture and Sustainable Development program (ADD). The Regional Council of Midi-Pyrénées and the National Institute for Agronomic Research (INRA) provided the PhD fellowship of Lucie Clavel. The authors want to thank Arnaud Reynaud (INRA, LERNA, Toulouse) for his particular help in the study.

IV.2. Un outil pour construire et évaluer des distributions de systèmes de culture

IV.2.1. Résumé en français

La construction d'un outil pour construire et évaluer des distributions de systèmes de culture a fait l'objet d'un second article soumis à Environmental Modelling & Software. L'objectif de ce second article est de proposer à un utilisateur un outil qui, à partir d'une situation de référence (dont la construction est décrite dans le premier article pour ce cas d'étude), permette de modifier la distribution des systèmes de culture puis de donner des indicateurs d'évaluation de la nouvelle distribution (appelée « scénario »).

L'élaboration de cet outil repose sur la réalisation d'un cahier des charges qui spécifie les conditions que doit remplir l'outil pour permettre à n'importe quel utilisateur (1) de construire simplement un scénario, autrement dit de sélectionner un sous-espace du territoire où il voudrait modifier les systèmes de culture et d'y proposer la substitution d'un système de culture par un autre et (2) d'évaluer le scénario ainsi construit, autrement dit de choisir un indicateur d'évaluation, d'en calculer sa valeur et de déterminer la manière de le visualiser (niveau d'agrégation, forme).

L'outil, appelé SPACSS (SPAtial Cropping System Scenario builder and evaluator), contient les différents éléments suivants.

- **Une situation de référence** détaille dans une table et pour chaque unité de support l'ensemble des surfaces de chaque combinaison type de sol*type d'exploitation*système de culture. Elle permet à l'utilisateur de disposer d'une représentation de la distribution des systèmes de cultures et de leur impact sur la demande en eau du système Neste.
- **Une interface d'entrée** (GUI-IN) permet de définir la distribution alternative que l'utilisateur veut évaluer, c.a.d. de sélectionner dans cette table un sous-espace (ensemble de combinaisons) selon des facteurs de localisation. Elle permet aussi dans ce sous ensemble, de définir le système de culture à modifier et par quel système de culture les modifier. Cette interface permet de générer une table représentant une distribution alternative des systèmes de culture du système Neste.
- **Un modèle distribué**, c.a.d. dont une simulation est effectuée pour chacune des entités de la table, permet d'évaluer l'impact de la distribution alternative des systèmes de culture. Le modèle utilisé pour le système Neste est MO_uSTICS, un modèle bio-

décisionnel, qui permet de simuler (1) la croissance des cultures et la dynamique de la réserve en eau du sol selon les formalismes de STICS (Brisson et al., 1998) et (2) les apports d'eau selon les règles de décision développées dans le modèle MODERATO (Bergez et al., 2001). Les indicateurs simulés par ce modèle pour chacune des combinaisons sont stockés dans des tables appelées tables d'impact brutes (*first degree impact tables*) qu'une interface de sortie (GUI-OUT) permet d'interroger.

- **L'interface de sortie** permet à l'utilisateur de sélectionner non seulement l'indicateur qu'il désire évaluer, mais aussi son niveau d'agrégation en fonction des facteurs de localisation et des systèmes de culture, et son mode d'agrégation. Elle permet ainsi de générer une table d'impact personnalisée (*tailor made impact table*) facilement utilisable pour produire différent type d'information (cartes, graphiques, indicateurs).

Après une description de l'outil, nous présentons son application pour deux scénarios. Ces applications montrent la diversité d'indicateurs que l'on peut obtenir à partir de seule la demande en eau estimée par MO_uSTICS. Ces exemples montrent aussi que l'utilisation comme la construction d'un outil permettant de discuter de distributions alternatives de systèmes de cultures (c.a.d. de distributions possibles probables ou désirées) doit se positionner au cœur d'un processus itératif de discussion entre les concepteurs de cet outil et ses utilisateurs.

IV.2.2. SPACSS: A tool for translating qualitative scenarios of cropping system distribution into maps of cropping systems

Lucie Clavel^{a,*}, Marie-Hélène Charron^a, Olivier Thérond^a, Delphine Leenhardt^a

^a INRA; UMR AGIR; 31320 CASTANET TOLOSAN, France

* lucie.clavel@toulouse.inra.fr

Tel: +33 5 61 28 57 12

Fax: +33 5 31 73 55 37

IV.2.2.1. Abstract

Scenario approaches are increasingly used for dealing with land planning issues. Scenarios for farmland usually assess consequences of contextual changes (climate, prices, policies) on the distribution of cropping systems and their economic and/or environmental impacts. Such approaches usually use models to simulate the evolution of the cropping system distribution. However, the simulated cropping system distribution may not correspond to stakeholders' views about (1) what should be implemented for reaching a given objective or (2) what would result from a given contextual change.

In this paper we present an original tool to (1) generate cropping system distributions foretold by a user without using any simulation model, and (2) assess the environmental and economic impact of these distributions. The tool was applied to a catchment in south-western France, where water demand for irrigation is a social issue. We present in this paper two examples of scenarios of cropping system distributions that can be built with SPACSS. This first version cannot simulate complex scenarios but it can already compute a large set of indicators at different scales. It is the first stage of a participatory modelling programme to produce a tool well understood by stakeholders and well adapted to their needs and their diversity.

Keywords: Scenario, Cropping systems, Spatial distribution, Water planning, Land planning, Land use, Indicators, Decision-making.

IV.2.2.2. Introduction

Scenarios are increasingly used for dealing with issues such as land use planning. They have been used successfully to facilitate the involvement of stakeholders in land use issues (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). They provide stakeholders with economic,

environmental and social indicators, quantified or qualified for each scenario, facilitating the decision-making process (Alcamo, 2001).

Scenarios are a plausible sequence of possible events used to highlight future trends and consequences of potential decisions (Dockerty et al., 2006). A scenario approach (also called “scenario analysis”, “scenario-based assessment” or “scenario exercise” by Alcamo, 2008) includes the description of four components: (1) the initial state of the system, (2) the trends or trend deviations of the drivers of the system, (3) the response of the system to these changes in drivers, also called system response, described either dynamically from the initial state up to the time horizon considered or through a snap-shot description of the “final” state, reached at the time horizon, and (4) the quantitative or qualitative assessment of adequate indicators characterising the economic, environmental and social impacts of the changing driving forces.

A common characteristic of scenario approaches is the vantage point, i.e. the state of the system from which the scenario is developed (Van Notten et al., 2003). In “backcasting” approaches, scenarios start to be developed from the final (possible or desirable) state of the system in order to work out which conditions (driver trends and intermediate system responses) should unfold from the known initial state of the system to reach the expected final state. In forecasting approaches, scenarios consider the initial state of the system as their starting point, and then define possible evolutions of drivers and system response in order to explore possible final states (or futures) of the studied system (Rotmans et al., 2000; Van Notten et al., 2003).

Scenarios can be normative or exploratory. Normative scenarios, also called “what for?” scenarios, try to investigate what norms are to be implemented in order to reach a given desired state of the system. Conversely, explorative scenarios are associated with the question “what if?” and explore the range of possible, but not necessarily probable, futures. Exploratory scenarios investigate the possible evolution of the system by making assumptions (i) about driving forces: what can happen with specified driving forces (controllable or not by the stakeholders)? (e.g. Börjeson et al., 2006) and/or (ii) on the system response: what are the environmental and economic impacts if the system reacts to a given driving force in a certain manner (e.g. by increasing the acreage of one particular species)? (e.g. Jessel and Jacobs, 2005; Van der Werf et al., 2007)

Scenario approaches use quantitative and qualitative knowledge in the process design (Alcamo, 2001; Van Notten et al., 2003; Popper, 2008). Qualitative methods, often called narrative methods, are used in order to capture knowledge, perceptions and interpretations of

experts or stakeholders. The role of qualitative methods in building and assessing the relevance of scenarios is increasingly claimed and recognised (Van Notten et al., 2003; Popper, 2008; Therond et al., 2009). Quantitative methods are used to quantify components of scenarios or to check the consistency of qualitative scenario assumptions. The quantified variables facilitate the understanding of the scenario and thus decision making (Alcamo, 2008). Such methods are usually based on the use of computer models. All the components described in the scenario approach (initial state, driving forces, system response and impacts) can be described either qualitatively or quantitatively. Some scenario approaches, called semi-quantitative approaches, mix the use of models and of qualitative information.

Scenarios, and particularly land use scenarios, are commonly used in agricultural areas for integrated assessment (Jakeman and Letcher, 2003). Agricultural management practices greatly affect production and environment. For instance diffuse pollution depends on weed control and fertilisation practices (Biarnès et al., 2004) and water demand is influenced by sowing dates, varietal earliness choice and irrigation strategy (Maton et al., 2007). Consequently, such scenario studies should describe cropping areas by cropping systems, i.e. by crop rotations and cultural practices. Accordingly, in land use scenarios, the initial and final states of the system would correspond respectively to the initial and alternative cropping system distributions (or mosaic) of the study area (e.g. Verburg et al., 2006). Computer models are often used for developing land use scenarios. They can be used for generating initial cropping system distribution. For example Viaud et al. (2008) used computer models to generate field mosaics and to distribute crops in these fields.

Models can also simulate drivers (e.g. agricultural markets) and agricultural system evolutions (e.g. Van Ittersum et al., 2008). Different modelling approaches simulating the evolution of cropping system distributions or land use change are listed by Lambin et al. (2000). Examples are multi-agent models (Etienne et al., 2003) or Markov chains (Le Ber et al., 2006). Finally, simulation models are also often used for calculating the impacts of the scenarios. A frequent approach to estimate the economic and environmental impact is to use a spatialised cropping system model. This type of model simulates crop growth and yield and environmental factors (e.g. nitrate transfer and run-off). Accordingly it allows the effects of the studied scenario on production or gross margins and environment to be estimated (e.g. Lautenbach et al., 2009; Van Ittersum et al., 2008).

All scenario elements, particularly alternative cropping system distributions, can also be characterised qualitatively. In the reviewed studies, this characterisation is mainly based on expertise or scientific knowledge. Expertise is mainly used to define the nature of alternative

cropping systems (crops and practices), while their spatial distribution over the studied area is usually very simplified: for instance a single alternative cropping system is applied over the whole area considered (e.g. Wechsung et al., 2000; Wang et al., 2008), or part of it (e.g. Stolte et al., 2005). We did not review any scenario approach where the distribution of cropping systems is expressed in a narrative way by stakeholders. However, public debates of agro-environmental issues show that stakeholders may have assumptions on probable or target future cropping systems, and possibly on their spatial distribution. For example, in south-western France, opponents of the Charlas dam construction argued for a reduction in 15% of the irrigated area in order to limit water deficits (Mandement, 2004). These stakeholders did not completely describe the alternative cropping system distribution: the proposal does not suggest alternatives to maize or where it could be eliminated. This was probably due to a lack of a suitable tool and of favourable conditions to conduct such a study, due to legal constraints associated with the public debate procedure. This debate showed however that various stakeholders were concerned by the water management issue and that they could have interpreted this proposal to reduce the maize area in various ways because of their varied interests and points of view on territorial development.

We consider that too few scenario approaches encourage and enable stakeholders to define and formalise their assumptions and proposals for alternative cropping system distributions. The description of alternative cropping system distributions by stakeholder is usually narrative. The following step, consisting of evaluating the proposed cropping system distributions, can also be qualitative. But it is often claimed that providing quantitative indicators facilitates the decision making process. We thus argue that there is a need for a tool that helps to translate a qualitative description of a spatial distribution of cropping systems into a set of quantitative and geo-referenced data that can be used to compute quantitative evaluation indicators.

In the first part of this article we present the specifications for such a tool, called SPACSS. After describing the study area, we describe the tool, implemented to deal with quantitative water management issues of this area. In the second part we illustrate how this tool can be used on two example scenarios and we discuss how this tool can be improved and used.

IV.2.2.3. Material and methods

Specifications for SPACSS

As a SPAtial Cropping System Scenario builder and evaluator for water planning, SPACSS is required to help users, mainly stakeholders, (i) to build scenarios in the form of cropping

system maps that describe changes in the spatial cropping system distribution which they assume or expect and (ii) to assess impact indicators that make sense for them.

Building scenarios of cropping system distributions

SPACSS is supposed to be used in situations where stakeholders are able to qualitatively describe the evolution of the spatial cropping system distribution or in situations where they want to evaluate alternative spatial cropping system distributions. One first objective of SPACSS is therefore to help users to translate a description of a cropping system distribution in the investigated study area into a map where cropping systems are quantitatively described and geo-referenced. Such alternative maps of cropping systems can be (i) a modification of the spatial distribution of current cropping systems, and/or (ii) a modification of their proportions, and/or (iii) a modification of the cropping systems themselves through the introduction of innovative cropping systems. This assumes that a reference situation is defined which describes the cropping systems distribution to which changes will be applied. To apply such changes, SPACSS should meet two main capabilities: the first is to allow the user to identify the location of the changes and the second is to allow the user to define, for each location, which cropping system is changed and by which cropping system(s) it is to be substituted. To identify the location of the changes, the user should be able to select entire geographical areas or parts of them. Intended or expected changes may concern areas with well-defined boundaries, e.g. administrative areas such as municipalities or districts, or corresponding to a specific management area, e.g. a given protected area such as “nitrate vulnerable zones” in the European Union. We call such areas geographical divisions. Changes may also concern a particular context that may be encountered in several geographical divisions. For example, changes may concern cropping systems located in valleys, whatever the municipality. We call location factors such variables used to locate changes in cropping systems. They explain the occurrence of particular cropping systems at particular places and can be used by stakeholders to justify changes in cropping systems location. They can be considered invariant in time at least in the short term (Clavel et al., in review). To define the cropping systems that should be modified or substituted, the user should be able to select a crop and to define its associated management system.

Accordingly SPACSS should include the description of a reference situation in terms of cropping systems distribution, and a Graphical User Interface (GUI) that would allow the user to define (i) the location of changes, by specifying the geographical divisions and/or the location factors concerned, and (ii) the nature of the changes, in terms of cropping systems.

Evaluating scenarios

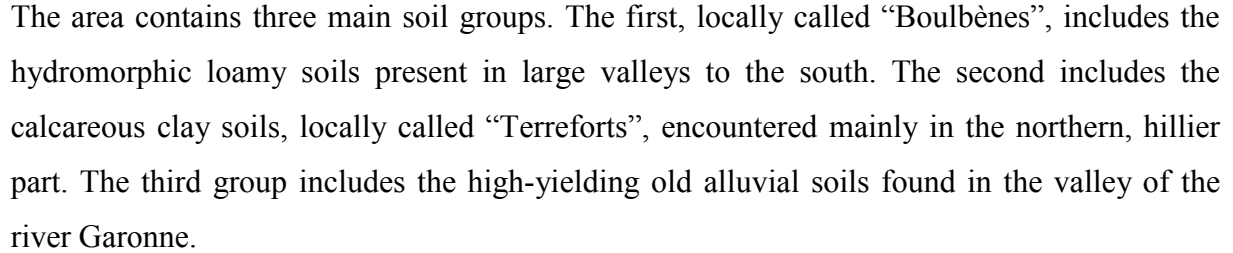
To assess the impact of scenarios in a quantitative way, SPACSS should include model(s) that can output values of state variables, from which indicators can be computed. The choice of adequate indicator variables determines the choice of the models. In agricultural land use scenarios, cropping system models are often used to assess crop production and environmental impacts. These models are run on simulation units that are homogeneous as regards their input data (mainly soil, climate, crop and technical operations). To account for the spatial heterogeneity of soil, climate and cropping systems at a regional scale, and thus provide insights of the spatial heterogeneity of their impacts, crop models must be spatialised (Faivre et al., 2004). In other words they must be run for all relevant combinations of soil, climate, crop and technical operations to provide model outputs for each simulation unit. This may not make sense for stakeholders because of the nature of the state variables output from the model and because of the level at which they are provided. To get indicators that are meaningful for stakeholders, these model outputs should thus undergo an adequate transformation process, e.g. conversion, spatial aggregation (average, median, sum etc.), comparison with the reference situation, and should be presented appropriately, e.g. by maps, curves, graphs, tables, etc. Defining adequate communication tools is a key ingredient of Integrated Assessment Modelling (Parker et al., 2002).

SPACSS should include one or several models calculating useful variables to evaluate cropping system impacts, and a GUI that would allow the user to select the variables and to choose the way they should be aggregated and viewed.

The study area

The study area corresponds to a water management area called the “Neste system” (Figure 15). This 8 000 km² catchment is equidistant from the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. It extends from 43 to 44° N and from 0 to 1° E over the region known as “Gascogne”.

0°00" 1°00"E



Regarding water resources, the Gascogne region is naturally deficient, for two reasons. The first is that the region experiences an evaporative deficit from April to September on average. Rainfall is low, but also extremely irregular both from year to year and from month to month in summer. The second reason is that the Gascony rivers, that drain a vast glacial alluvial cone disconnected from the Pyrenees, do not benefit from the melting of high mountain snow. In order to mitigate these natural constraints, a water distribution system, called the “Neste system”, has been developed over the years. A canal diverts water from mountain reservoirs into the 18 Gascony rivers used as natural channels. Reservoirs (with a present capacity of more than 44 Mm³) are also located at the head of these rivers. Filled during winter, they complement the system’s resources. Most farmers can therefore get water from the artificially

recharged rivers, either directly or from a pressurised irrigation network. Thanks to the Neste system, but also to European Common Agricultural Policy, the irrigated area has been increased about threefold since the 70s. Nowadays the system faces a lack of water about two years out of ten that threatens the environmental equilibrium of the rivers and the ability to provide adequate water for agricultural needs. The project of building a 110 Mm³ reservoir (the Charlas dam) to support natural flows of the Garonne and its tributaries led to a public debate that attracted the attention of the whole of south-western France about agriculture issues (Mandement, 2004). Proponents of the project argued that the dam could both sustain natural flows and increase the water supply for other uses such as irrigation within the Neste system. Opponents called for a reduction of 15% in the irrigated area in order to restrict water deficits. Irrigated agriculture thus became central to the debate, which is unsurprising in an essentially rural area where the water demand for domestic use remains limited (13 Mm³) compared to irrigation use (70 Mm³ on average).

The Neste system spreads over 2 French regions, 5 *départements* and 602 municipalities. It also covers 24 Small Agricultural Regions. These Small Agricultural Regions were delineated in the 50s according to agriculture-related criteria (mainly soil and climatic conditions). Even after more than fifty years of existence the Small Agricultural Regions still well represent uniform farming zones (Mignolet et al., 2007). The Neste system has also been divided in 19 water management units by the public-private company “Compagnie d’Aménagement des Coteaux de Gascogne” (CACG) operating the Neste system. CACG management units represent longitudinal sections of rivers’ catchment areas. They are used by CACG to plan its water management and to optimise water releases in different rivers according to local demand (mainly irrigation and ecological needs).

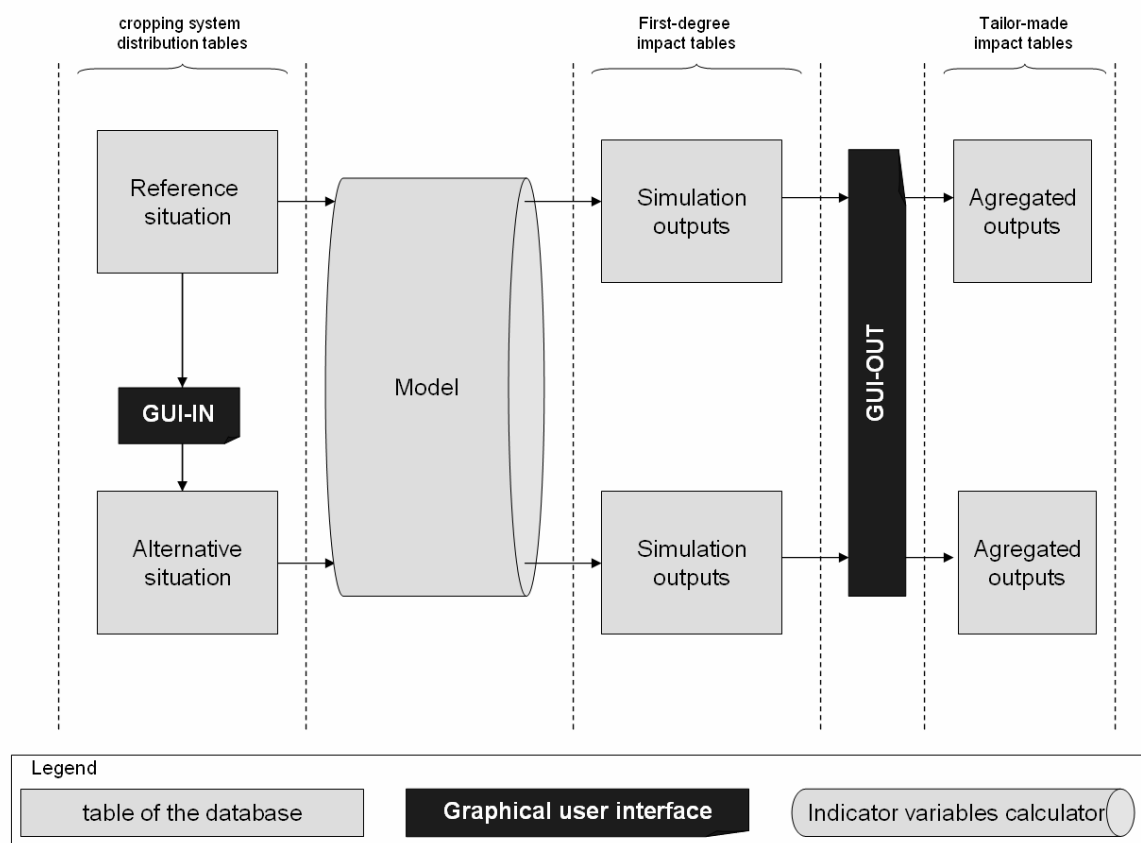
Description of SPACSS

SPACSS general framework

The SPACSS model combines a spatialised cropping system model, a relational database and GUIs (Figure 16). The relational database contains various tables describing the cropping systems (crop and management system) and their location (support unit). Since the support unit is geo-referenced, these tables can be easily used on any GIS software to compute cropping system maps. A table describing the initial state of the system (hereafter called the reference situation) is already computed and available. A GUI-IN permits the user to specify the rules to derive the alternative cropping system distributions from the reference situation. SPACSS then activates a biodecisional model to generate a table corresponding to model outputs at each location (support unit). We will call this table the first-degree impact table.

Finally a GUI-OUT allows the user to customise this first-degree table by defining the transformations of model outputs needed to compute the expected indicators and thus obtain a “tailor-made” impact table. We will now present these different components in more detail.

Figure 16: SPACSS general framework



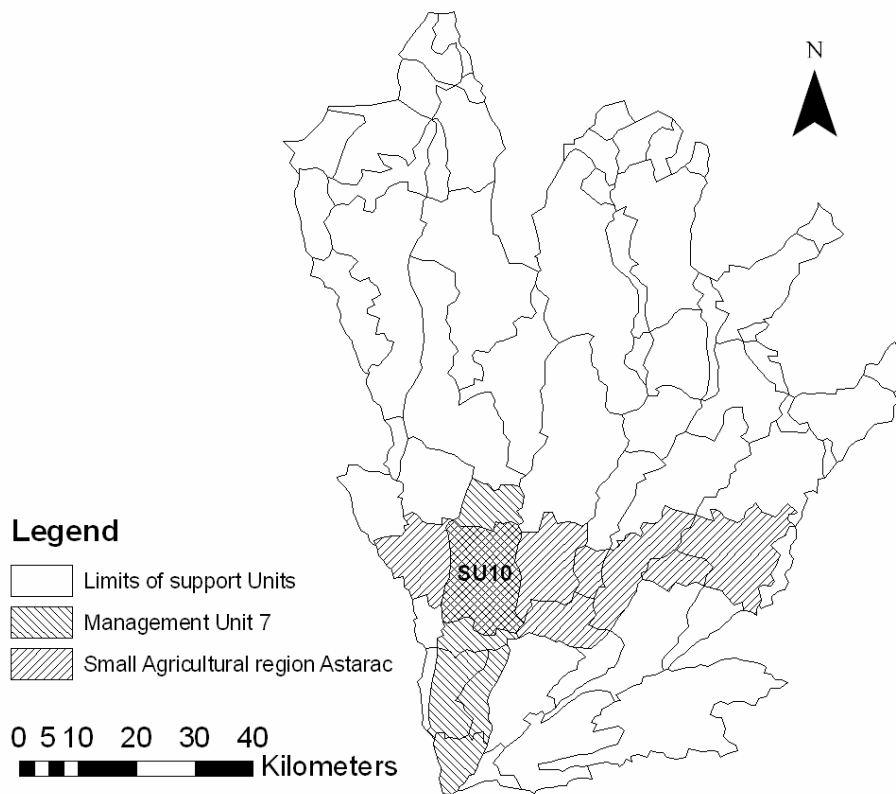
The reference situation

The reference situation describes the initial state of the system in the scenario approach. It clearly presents and links the current geographical divisions, location factors and cropping systems. The reader can refer to Clavel et al. (in review) for details of this reference situation: arguments, description and construction. Hereafter we give only the main characteristics.

The reference situation is the table of the relational database where all support units are characterised, that is, the areas of each combination of location factors and cropping system for the reference year are indicated for each support unit. In the case of the Neste system, we assumed that relevant location factors are variables describing climate, soils and farms. We chose as reference the year 2000 for which we had the most information related to farm characteristics. The study area was divided into support units corresponding to intersections between water management units and Small Agricultural Regions (Figure 17). Each support unit was associated with one set of weather records. From soil surveys and expertise, we identified 3 main soil types and 10 farm types. A total of 11 cropping systems, defined as

crop-irrigation management combinations, were identified: 4 irrigated systems (maize, sorghum, soybean and sunflower) and 7 rainfed cropping systems (durum wheat, maize, oilseed rape, sorghum, soybean, sunflower and wheat). For the sake of simplicity we did not account for crop rotations. All these cropping systems were associated with a set of irrigation management rules. We used a semi-quantitative distribution procedure, described in Clavel et al. (in review), to allocate the cropping systems, farm types and soils to each support unit and to determine the area of each combination within each support unit.

Figure 17: Division into support units of the Neste system. Support unit 10 (SU10) belongs to management unit 7 and to Astarac small agricultural region



The GUI-IN and scenarios of cropping system distributions

The GUI-IN allows the user to specify the rules to be used to compute alternative cropping system distributions. The GUI-IN (Figure 18) first proposes to select the support units where changes in cropping system distribution have to be applied, either by selecting a geographical division (e.g. all support units contained in one small agricultural region) or by defining a rule based on a climatic variable (e.g. all support units with an annual precipitation below a certain threshold). Then it proposes to apply the changes to parts of the selected support units according to rules based on location factors (soil or farm variables). For instance it is possible to apply changes only to soils with gentle slope and/or only to farms with an irrigated area below 40 % of the total agricultural area. Finally the GUI-IN proposes to specify the cropping

system substitution: which cropping system would be eliminated and which would replace it. The substitution and allocation rules so defined through the GUI-IN allow SPACSS to generate a new table of cropping system distributions.

Figure 18: The GUI-IN

The model and first degree impact tables

The model implemented for the Neste system was the MO_uSTICS bidecisional model. This was chosen because quantitative water management issues were dominant: we thus wanted to assess any change in crop area by its impact on irrigation water demand by farmers (environmental impact), but also by its economic impact. MO_uSTICS integrates (i) a generic dynamic crop model, STICS (Brisson et al., 1998), that simulates variables relevant for evaluating scenarios of cropping system distribution (production variables such as crop yield, and factors such as irrigation water and nitrogen used and nitrate leaching) for the different crops present within the Neste system, and (ii) a decisional model that explicitly simulates irrigation applications through farmers' decision rules based on crop, soil, weather and water resource indicators (Bergez et al., 2001). Cropping systems, soil and weather information is required as input data for running this model. The model is run for one year only.

For any record of cropping system distribution tables, that is, for any combination of support unit, soil, farm type and cropping system, the MO_uSTICS model calculates the values of state

variables that can be used as impact indicators. First degree impact tables store the values of all simulated MO_uSTICS outputs.

The GUI-OUT and "tailor-made" impact tables

The GUI-OUT aims at customising first degree impact tables according to the user's needs. It allows the user first to select the criterion of aggregation (geographical division and/or location factors), and then to determine the impact indicators i.e. the variable of interest to the user. In this first version of SPACSS the user can choose as impact indicators either daily water demand or accumulated water demand on a given day. The resulting "tailor-made" impact tables present the spatial distribution of values of indicator chosen by the user(s).

Software solution

A relational database stores (i) the areas of the different combinations of support unit, soil, farm type and cropping system, and, for each combination, (ii) the access path to related files for running MO_uSTICS and (iii) the MO_uSTICS outputs. It runs under the Microsoft ACCESS software. SQL requests are used after the GUI-IN and after the GUI-OUT to generate respectively the alternative distribution of cropping system and the tailor-made impact map.

IV.2.2.4. Application and discussion

Application to two scenario examples

In order to present the diversity of the scenarios that can be developed with the SPACSS tool, we present here two simple scenarios that operate the same cropping system substitution over the whole Neste system but according to different location factor variables. In the first scenario (Scenario 1) we replaced all irrigated maize grown on steep slopes by sunflower crops. The latter are irrigated only once, if needed, at the flowering stage. In the second scenario (Scenario 2), the same substitution is operated but in farms of small economic size. We run these scenarios (reference scenario, scenario 1 and scenario 2) with weather data of year 2000. Table 1 summarises the characteristics of these two scenarios and presents the outputs of SPACSS.

Table 4: Description and evaluation of the two scenarios. The evaluation is expressed at the Neste system level and in comparison to the reference situation

SCENARIO DESCRIPTION	Scenario 1	Scenario 2
Geographical division	Neste system	
Location factor	Slope = steep	Economic size of the farm = small
Cropping system to be replaced	Irrigated maize	
Cropping system to implement		
Crop	sunflower	
Associated management	One water application at flowering stage if needed (i.e. If the soil water reserve is below 70% of its available water capacity)	
Area of the substitution	7 655 ha	11 302 ha

SCENARIO EVALUATION (in comparison to the reference situation)

Reduction in water demand

Total (Mm ³)	10,5	12,6
Percent (%)	11,5	13,8
Per hectare (m ³ /ha)	1375	1110

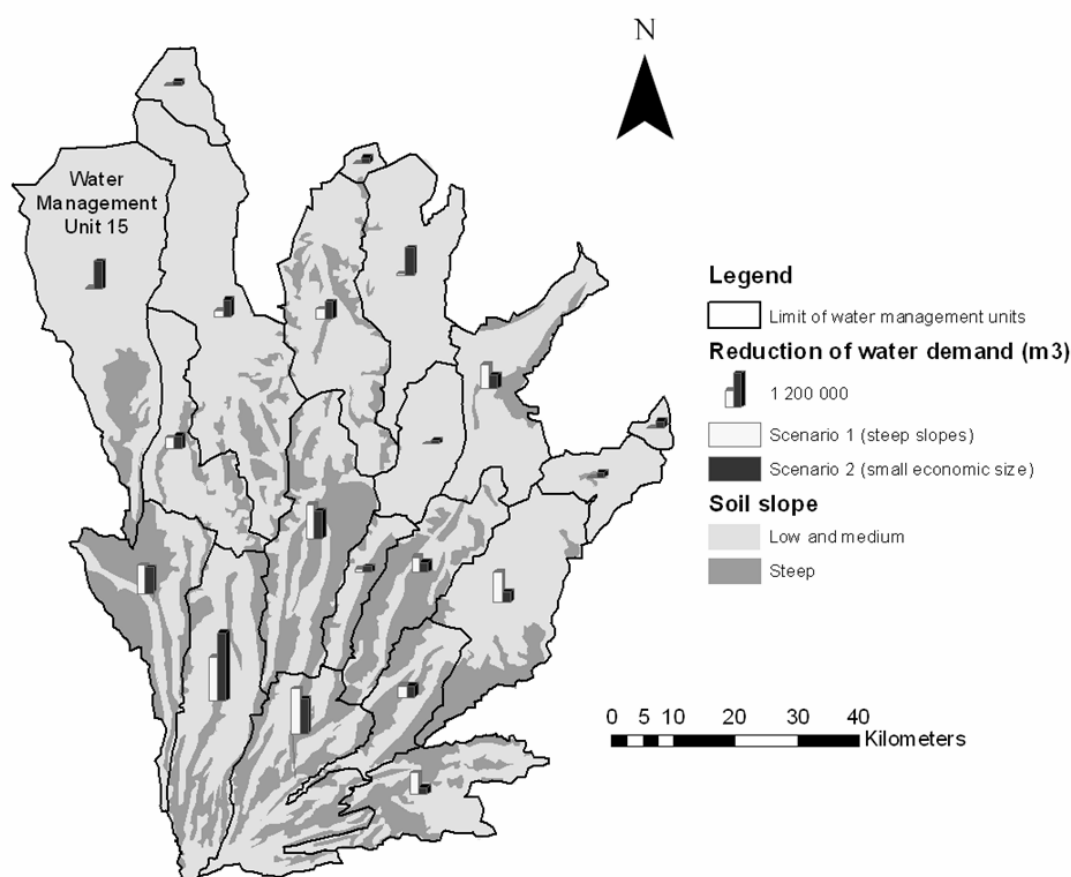
Indicators produced

A first indicator is the total irrigation demand from the whole Neste system accumulated over the whole irrigation season. The reduction in total irrigation demand resulting from scenario 2 is 12,6 Mm³ (13,8% of the total irrigation demand of the reference scenario) while that resulting from scenario 1 is only 10,5 Mm³ (11,5%). This is consistent with the fact that scenario 2 leads to a greater reduction in irrigated maize area (11 302 ha, vs 7 655 ha for scenario 1). The reduction of the total irrigation water demand caused by both scenarios can be compared to the capacity of dams recently built on the Neste system. The last 2 dams (operational since 2007) store a volume of 6,55 Mm³, which is less than the reduction in irrigation water demand resulting from both scenarios. A second indicator is the reduction in total irrigation demand divided by the area where irrigated maize has been substituted by irrigated sunflower. We notice that the average reduction of water demand per hectare is lower for scenario 2 (1110 m³/ha) than for scenario 1 (1375 m³/ha). The better efficacy of

scenario 1 to reduce irrigation demand at field level suggests that it is possible, with this kind of scenario, to minimize the area to be substituted. These two indicators for the whole studied area can be used by various stakeholders in debates about planning and agricultural management, e.g. to explore alternative solutions, particularly agro-ecological options, to the building of dams.

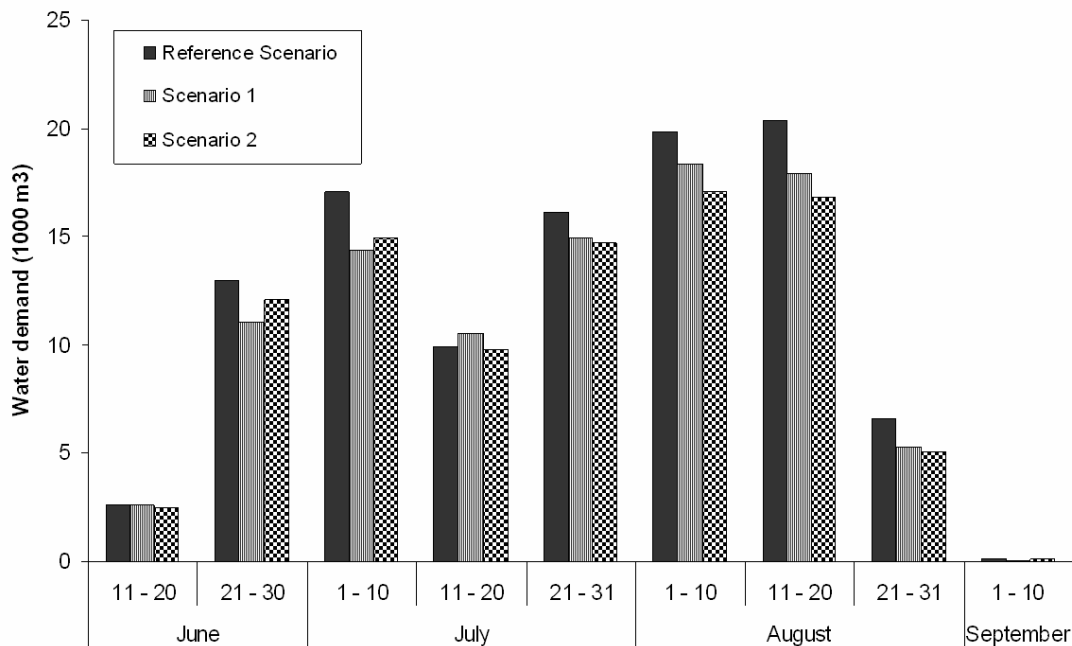
Spatially and temporally distributed indicators can also be produced by SPACSS. Although the substitution of irrigated maize is more efficient on steep slopes at the Neste system level, scenario1 appears inappropriate if the objective is to decrease irrigation water demand in water management (unit 15 for example (Figure 19)). Indeed, the area of soils with steep slopes is very small in this part of the Neste system, so the proportion of irrigated maize concerned by the substitution of scenario 1 is similarly small. Such spatially distributed indicators can be used by water planners to decide where to build dams. Operational water managers may also be interested by such indicators when they face recurring difficulties of water supply on particular areas.

Figure 19: Spatial distribution, for each water management unit, of the reduction in irrigation demand resulting from scenarios 1 and 2 for the year 2000



The reduction in water demand resulting from both scenarios also varies over time. Figure 20 compares the reduction in water demand resulting from both scenarios for 10-day periods. It appears that the substitution of irrigated maize by irrigated sunflower on steep slopes is more efficient at the beginning of the summer (i.e. before the 10th of July), while the same substitution occurring in small farms is more efficient after the 20th of July. In the Neste system, the crisis period for water supply usually occurs at the end of July and the beginning of August: the natural flows of rivers can no longer supply water for irrigation, and as the maize flowering stage is over, reservoir levels are already low. This kind of indicator is therefore of great relevance to managers operating water systems such as the Neste system, because it can help one to choose between two scenarios according to their capacity to minimise the crisis. Here for example, the water manager would certainly prefer scenario 2 which reduces the peak of water demand more than scenario 1.

Figure 20: Distribution over time, by 10-day periods, of irrigation demand at the Neste system level resulting from the reference situation, scenario 1 and scenario 2 for the year 2000



This first application shows the analytical capacities of SPACCS to compute a wide range of indicators of water demand that may be of interest to a range of stakeholders with possibly opposing views. For example, we saw that operational water managers whose aim is to satisfy all types of water use throughout the irrigation season would use some indicators, e.g. on the temporal distribution of irrigation demand, that are not necessary to water planners who have to satisfy these uses on a long term. But some indicators, e.g. those describing the spatial distribution of the demand, would be useful for both of them. During the Charlas public debate, we could see that, for political and/or economic reasons, some stakeholders wanted to

favour the development of irrigation while others, for environmental and/or political reasons, wanted to reduce it. To allow such multi-actor discussion, it is necessary that SPACSS also provides economic indicators, such as gross margins at the Neste system level and for each farm type.

Towards other scenarios

The test of these two simple scenarios suggests other interesting scenarios that could be tested. For example, one testing the substitution of maize by sunflower on the largest farms should be also of interest. The underlying assumption is that such farms are more able to withstand the loss of income which might result from the substitution of maize by sunflower. However this ability certainly depends on the level of irrigation equipment repayments of these farms, and on the proportion of the total irrigated area that would be substituted. A total substitution (100% of the irrigated maize area replaced by sunflower) would certainly seriously affect the income, even on large farms. Unfortunately, this first version of SPACSS does not allow partial substitutions, e.g. only 10% of the irrigated area of maize. Another interesting scenario would be to replace irrigated maize by wheat or peas. If these crops are to be irrigated, this is done earlier than for maize. A consequence of such substitution at the Neste system level would be to lower even more the irrigation demand peak that generally occurs at the beginning of August.

Testing SPACSS on 2 scenarios suggested to us new interesting scenarios to be tested. The same is likely to occur with stakeholders. SPACSS will probably be used in an iterative way. Indeed, the GUI-OUT of SPACSS can be used as many times as necessary by users to provide various tailor-made impact tables. This facility meets the need to provide for a range of issues and points of view. It is also possible to use SPACSS many times to build and evaluate several scenarios. In fact it can be used in an iterative scenario approach where the user may want to refine the results obtained or question some hypotheses made when building the scenario. Iterations are common in scenario approaches: they are a way of refining visions of the future in the “story and simulation” approach. Alcamo (2008) and Therond et al. (2009) regard iteration as part of the scenario analysis.

SPACSS is the prototype of a co-development procedure

The diversity of impact indicators that can be computed by SPACSS is useful for dealing with various stakeholder questions. However it may be difficult for them to understand some of these impact indicators. For example in Figure 20, the fact that, from the 10th to the 20th of July, the water demand of both scenarios is almost equal to the reference scenario may be

surprising. A good knowledge of the tool and its input variables allows the modeller to explain this phenomenon: the single water application made on sunflower usually occurs during this 10-day period (83% of the water applied on sunflower for scenario 1 and 51 % for scenario 2). The concentration of the flowering stage (when irrigation is applied if needed) in this period is because the model activates the sowing of all sunflower crops of the region the same day. Thus we argue that the analysis of scenarios assessed with SPACSS should involve stakeholders and modellers, the latter helping the former to gain confidence in the results.

With a better understanding of the model, stakeholders may suggest the modification of the simulated indicators. For example we did not present simulated yields, because it is recognised that, although STICS correctly simulates the soil water reserve and crop development, it does not do so for crop yield (Brisson et al., 2002). A better yield estimate could be obtained by using production functions that express the yield of a crop as a function of the water used during the crop cycle. This could be a sensible solution in our scenario examples since, for a given crop, management systems only differ in their irrigation management (e.g. nitrogen fertilisation is similar for all maize systems). It is currently planned that the next version of SPACSS will enable the user to get tailor-made impact tables that can map crop yields, but also farm (or regional) incomes. This will involve combining the SPACSS database with other economic databases and economic functions to allow the calculation of gross margin per hectare of cropping systems for different price contexts.

Once impact indicators meet the expectations of stakeholders, the latter may propose to change the scenarios themselves. The first version of SPACSS is preliminary and is limited in this respect. For instance, the GUI-IN does not allow scenarios to be built where, for the selected areas, only a part of the area of a given cropping system would be replaced by another one: this version allows only full substitutions. Neither can a scenario be built where a cropping system would be substituted by two or more: for instance, it is not presently possible to substitute irrigated maize by winter rape in some parts and irrigated wheat in other parts. Agricultural areas are complex. Simple and uniform substitutions may not be feasible, due to farm or agronomic constraints for instance. As SPACSS does not consider crop successions, it would be necessary to account for crop rotations indirectly, by means of crop acreage. Indeed, a lot of studies consider that regional crop acreage is the spatial reflection of the temporal succession of crops over this region. Rounsevell et al. (2003) consider however that this hypothesis is acceptable only if the crop acreage of each farm is realistic. Thus for replacing irrigated-maize grown as a monoculture by a crop cultivated in a succession of n crops, the

model should allow the area of maize to be substituted to be divided equally between the n different crops of the rotation on each farm.

To be able to account for complex scenarios, but also to give the user the opportunity to choose different geographical divisions or to introduce new cropping systems, SPACSS obviously needs to be able to evolve. It is the effective use of SPACSS with various stakeholders, for building and/or evaluating a diversity of cropping system distribution scenarios that will challenge SPACSS and guide how it should be improved. However time-consuming, collaboration between stakeholders and modellers to develop SPACSS is certainly a guarantee of its effective use in changing contexts and for various users (Walker, 2002), and should take the shape of a feedback loop (Becu et al., 2008). SPACSS should then be considered as a prototype that will initiate the discussion with stakeholders in the framework of a co-development loop. Such a feedback loop, with a constant and diversified set of potential users, will improve the reliability of the indicators produced and will extend the possibilities of SPACSS to more complex and more realistic scenarios.

However this first version of SPACSS can already give clues to evaluate complex scenarios (e.g. a partial substitution of irrigated maize by irrigated wheat and winter rape): first the substitution of irrigated maize by irrigated wheat could be tested for different soil conditions, and then irrigated maize could be substituted by winter rape for the same soil conditions. Although the complex scenario is not evaluated as a whole, this approach can show which substitution is beneficial and which is not. If SPACSS were able to evaluate the complex scenario as a whole, we believe that such a step-by-step analysis would be helpful for stakeholders to better understand the impacts of complex alternative cropping system distributions.

Use of SPACSS in scenario approaches

SPACSS was developed to replace land use change models by stakeholder participation in agricultural land use scenario approaches. We assume that stakeholders are able to qualitatively describe alternative cropping system distributions in a scenario approach. We have good reasons (e.g. the Charlas dam debate) to think that this is true at local and regional scales, but perhaps not on a wider scale. Indeed, using SPACSS needs stakeholders to be able to say precisely which cropping system should be replaced, where it should be replaced and by which other cropping systems. On very large scales, like a whole country or a continent, it is probably difficult to find people with sufficient knowledge of cropping system distribution

on such a wide scale and who are able to formulate scenarios of cropping system distribution sufficiently precisely.

As we stated in the introduction, a scenario approach should define the initial and final states (and possibly the dynamic response) of the system, the driving forces that make the system evolve and the impacts of the scenario. SPACSS is a tool that aims primarily to allow the user to describe alternative final states of the system from its initial state, either in a normative or in an explorative scenario approach. It also allows (i) to build the cropping system distribution maps corresponding to the user descriptions and (ii) to assess the impacts of the alternative distributions. It does not explicitly represent the driving forces and the system dynamics. If necessary, quantitative and/or qualitative methods can be developed to complete the scenario approach and make explicit driving forces and the system dynamics.

IV.2.2.5. Conclusion

In agricultural land use scenarios, the evolution of cropping system distributions is often simulated by models. In this paper, we argue that stakeholders may have views on future cropping system distributions which would not be simulated by models. To deal with this limitation we developed an original tool that allows stakeholders to build alternative cropping system maps according to their own assumptions, and that evaluates the impacts of these spatial cropping system distributions.

SPACSS is a SPATial Cropping System Scenario builder and evaluator for water planning. It allows cropping systems to be modified and/or substituted at different geographical levels and according to different location factors (farm type, soil type and their associated quantitative or qualitative variables). It combines a spatialised cropping system model, a relational database and two graphical user interfaces. The outputs of SPACSS are tailor-made impact maps associated with user-built alternative cropping system distributions.

SPACSS was implemented over the Neste system, a catchment in south-western France that has come to public attention as a result of controversy about irrigation. The test of two simple alternative cropping system distributions shows the ability of SPACSS to provide stakeholders with a wide range of indicators. SPACSS should be considered as a prototype. It will initiate discussion with stakeholders as part of a co-development loop that will improve the reliability of the indicators produced and extend the possibilities of SPACSS to more complex and more realistic scenarios.

IV.2.2.6. Acknowledgments

The present study is part of the APPEAU project, funded by the French National Research Agency (ANR) as part of the Agriculture and Sustainable Development program (ADD). The Regional Council of Midi-Pyrénées and the National Institute for Agronomic Research (INRA) provided the PhD fellowship of Lucie Clavel. We also want to thank Alan Scaife for English-language editing.

IV.3. Applications

IV.3.1. Introduction

Dans l'article précédant (section IV.2.2.4), je présente rapidement un exemple de scénario afin de démontrer la diversité d'indicateurs que l'on peut produire grâce à SPACSS. Les scénarios proposés ne sont en revanche pas cohérents d'un point de vue agronomique. Par exemple, la monoculture de tournesol est interdite, cette pratique fait l'objet d'un arrêté¹⁸ depuis le 9 novembre 2005 pour limiter la lutte chimique et génétique contre le mildiou.

Ce constat nous renvoie à la question de l'objectif des scénarios produits : est-il d'explorer un futur probable, possible ou désiré ? La manière de construire les scénarios, ou l'argumentation justifiant la construction du scénario, sera différente en fonction de l'objectif poursuivi. L'objectif de cette section est donc de présenter deux jeux de scénarios construits en poursuivant des objectifs différents. Dans la première application, l'objectif du jeu de scénarios présenté est d'explorer l'impact du choix de précocité du maïs semé sur la demande en eau d'irrigation, indépendamment de la cohérence agronomique du scénario. Dans la deuxième application, l'objectif du jeu de scénarios est d'explorer l'impact de combinaisons logiques précocité-date de semis sur la demande en eau d'irrigation. La troisième application présente la construction d'un scénario exploratoire : l'objectif est de définir une distribution alternative des systèmes de culture possible.

Les trois applications présentées dans ce chapitre, comme celle présentée dans l'article présentant SPACSS, portent sur la sole de maïs irrigué. Notre objectif étant d'estimer la demande en eau d'irrigation, c'est un choix délibéré : en effet, le maïs irrigué représente légèrement plus de 80 % de la surface irriguée totale du système Neste, soit environ 63 000 ha (63 423 ha) des 80 000 des grandes cultures irriguées (77 077 ha¹⁹). De plus les propositions qui avaient été faites lors du débat public de Charlas portaient essentiellement sur la sole de maïs irrigué.

Ces trois applications ont été présentées à des agents de la CACG en avril 2009 et à des agents de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne en août 2009.

¹⁸ Arrêté du 25 mars 2009 modifiant l'arrêté du 9 novembre 2005 relatif à la lutte contre le mildiou du tournesol – NOR : AGR0907165A.

¹⁹ La surface totale irriguée dans le système Neste est de 87 000 ha, dans ces applications, je ne considère ni les cultures maraîchères, ni l'arboriculture.

Dans cette section, j'utiliserai l'abréviation UDS pour désigner les unités de support et Ugest pour désigner les unités de gestion CACG. Les Annexes 4 et 5 présentent la division du système Neste en unités de gestion et la division du système Neste en unité de support.

IV.3.2. Application 1 : Impact du choix de précocité du maïs semé sur la demande en eau d'irrigation

IV.3.2.1. Objectifs et hypothèses

Dans cette application, l'objectif du jeu de scénarios est de montrer la sensibilité de la demande en eau à la précocité du maïs semé. La précocité se définit, pour une culture, par le nombre de jours ou par la somme de températures nécessaire pour atteindre des stades spécifiés comme la récolte (Larousse agricole, 2002). Comme elle conditionne entre autres la durée du cycle de la plante, elle explique en partie ses besoins en eau (Girardin, 1998 ; dans Maton, 2006). Le choix de précocité devient pour certains agriculteurs, un élément stratégique de la planification de l'irrigation (France agricole, 2003 ; dans Maton, 2006).

IV.3.2.2. Scénarios

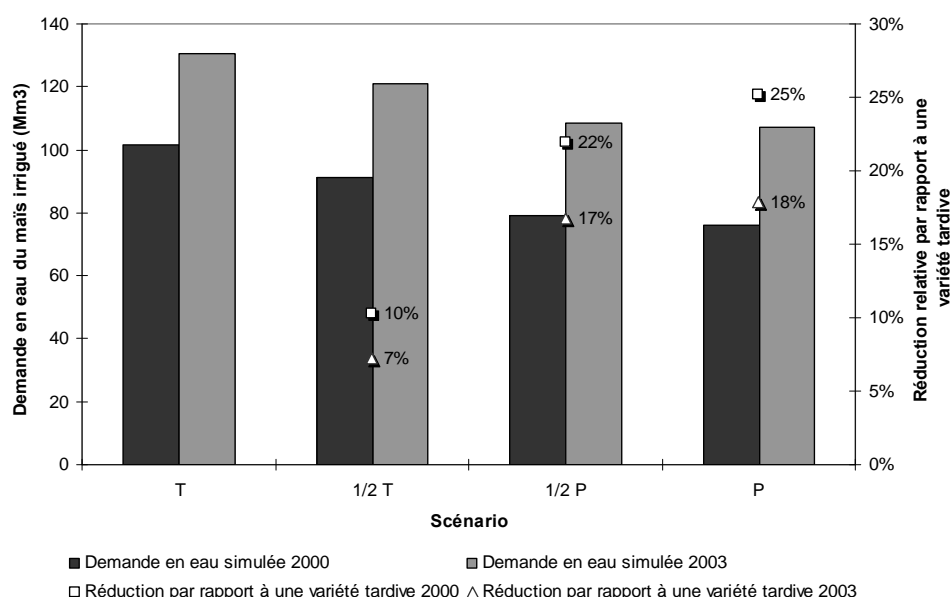
Pour évaluer la sensibilité de la demande en eau à la précocité et à la date de semis du maïs semé, cette application présente des scénarios dans lesquels les groupes de précocités du maïs irrigué sont modifiés sur la totalité du système Neste. Dans la situation de référence, du maïs tardif (variété Cécilia) est semé le 20 avril 2000 sur l'ensemble des parcelles de maïs irrigué du système Neste. Trois scénarios sont construits à partir de cette situation de référence. Pour chacun d'eux, une seule précocité de maïs est semée le 20 avril dans l'ensemble de ces parcelles de maïs irrigué. La situation de référence est appelée scénario T. Les trois autres scénarios testés consistent à substituer le maïs tardif du scénario T par des variétés plus précoces : mi-tardives (scénario : $\frac{1}{2}$ T ; variété : Furio), mi-précoces (scénario : $\frac{1}{2}$ P ; variété : DK300) et précoces (scénario : P ; variété : LG22).

IV.3.2.3. Evaluation

La demande en eau d'irrigation du maïs irrigué de ces quatre scénarios a été évaluée pour l'année 2000 caractérisée comme normale et l'année 2003 qui a été marquée par une forte sécheresse. L'avantage de cet outil d'évaluation est de pouvoir montrer quelle aurait été la demande réelle des irrigants cette année là s'il n'y avait pas eu d'arrêtés municipaux ou préfectoraux interdisant l'irrigation.

La Figure 21 présente l'estimation de la demande en eau du maïs irriguée cumulée à l'échelle du système Neste pour les quatre scénarios et les deux années. Globalement les sorties du modèle MO_uSTICS confirment que modifier la précocité du maïs va réduire la demande en eau d'irrigation. Pour des simulations effectuées sur l'année climatique 2000, nous obtenons une demande totale en eau d'irrigation destinée au maïs irrigué de 94 Mm³ pour le scénario de référence (T), de 92 Mm³ pour le scénario ½ T, de 78 Mm³ pour le scénario ½ P et enfin de 62 Mm³ pour le scénario P. Pour des simulations effectuées sur l'année climatique 2003, caractérisée comme sèche, nous obtenons une demande totale en eau d'irrigation destinée au maïs irrigué de 130 Mm³ pour le scénario de référence (T), de 121 Mm³ pour le scénario ½ T, de 109 Mm³ pour le scénario ½ P et enfin de 107 Mm³ pour le scénario P. L'écart relatif entre le semis d'une variété tardive et le semis de variétés plus précoces (½ T, ½ P et P) montre que le semis de variétés plus précoces est plus efficace pour l'année 2000 qui est une année de pluviométrie normale. En 2000, les réductions relatives générées par le semis de variétés plus précoces s'élèvent respectivement à 10 %, 22 % et 25 % pour les scénarios ½ T ; ½ P et P. En 2003 elles s'élèvent seulement à 7 %, 17 % et 18 % pour les scénarios ½ T ; ½ P et P.

Figure 21 : Demande en eau estimée pour les scénarios T, 1/2 T, 1/2 P et P sur le système Neste (années 2000 et 2003)

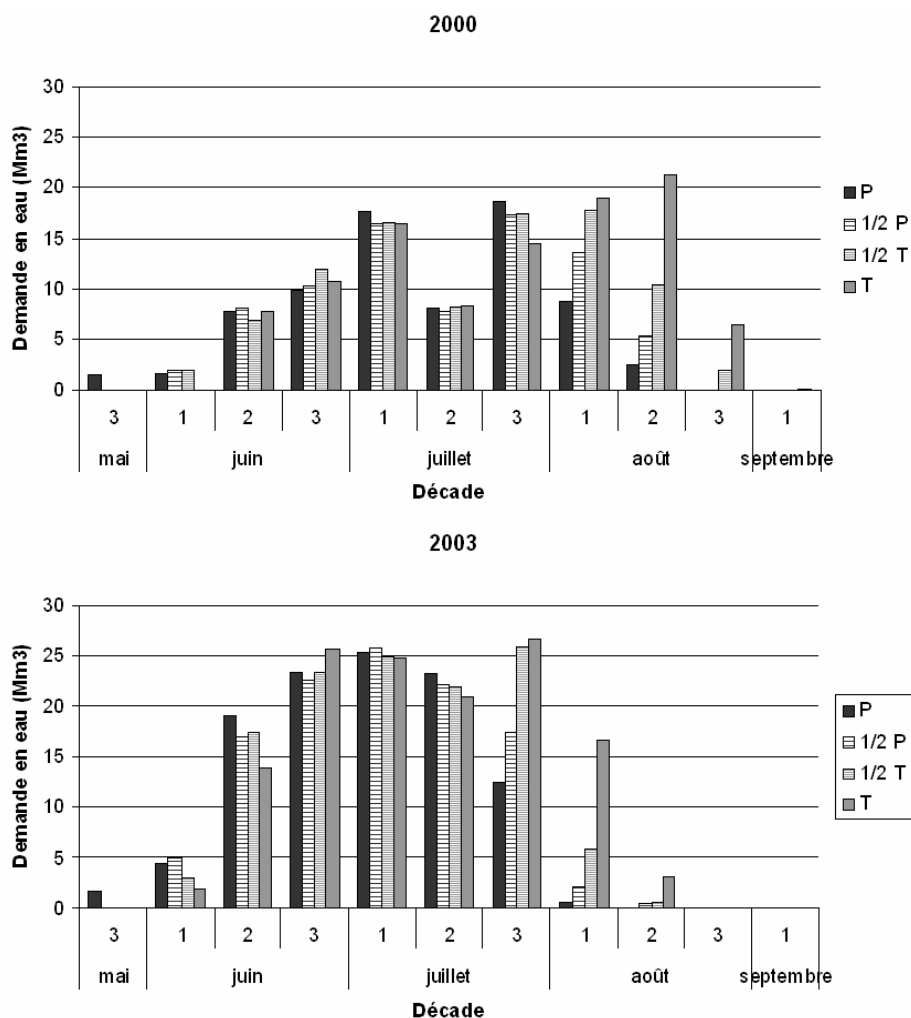


La Figure 22 présente la distribution par décade des prélèvements estimés pour les quatre scénarios sur les années 2000 et 2003. Pour les deux années de simulation, la campagne d'irrigation du maïs démarre plus tôt pour les variétés plus précoces (3^{ème} décade de mai pour les variétés précoces). Dans la 1^{ère} décade de juin, les prélèvements des scénarios (½ T, ½ P et P) sont nettement supérieurs à ceux du scénario de référence (T). Les variétés précoces

atteignent le stade 10 feuilles (stade de déclenchement de l'irrigation) avant les variétés tardives. Les sommes de températures pour atteindre le stade 10 feuilles sont respectivement de 630 °C.j pour les variétés T ; 575 °C.j pour les ½ T ; 515 °C.j pour les ½ P et 460 °C.j pour les P (cf. annexe 6). Le semis d'une variété plus précoce permet donc d'anticiper le déclenchement de la campagne d'irrigation.

De la même manière, le semis d'une variété plus précoce va anticiper l'atteinte par le maïs du stade 20-40 % d'humidité défini pour l'arrêt de l'irrigation. Ce stade est défini à de 1 650 °C.j pour les variétés T ; 1 535 °C.j pour les ½ T ; 1 455 °C.j pour les ½ P et 1 400 °C.j pour les P (cf. annexe 6). Notons que les fortes chaleurs de l'année 2003 réduisent la durée de la campagne d'irrigation pour les quatre scénarios.

Figure 22 : Répartition par décade de la demande en eau du maïs irrigué sur le système Neste (scénarios de référence T ; ½ T ; ½ P et P ; années 2000 et 2003).

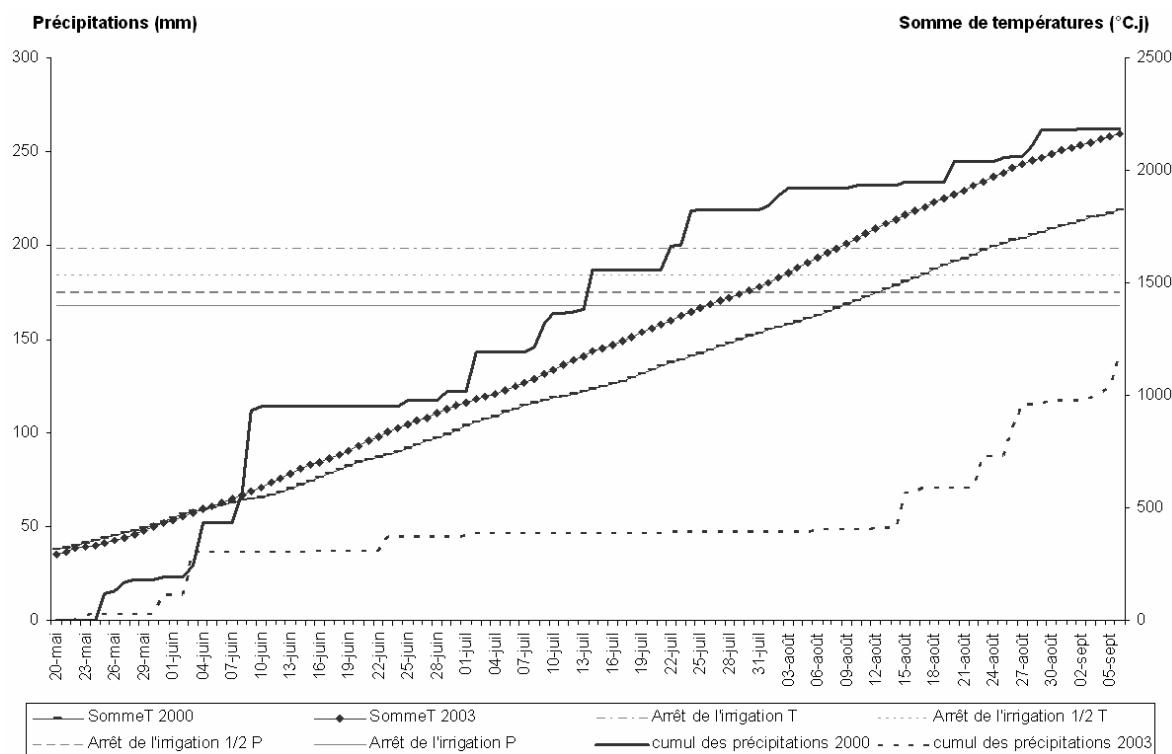


Sur la Figure 23, l'intersection entre une courbe de cumul des températures²⁰ (par le maïs à Auch) et une droite représentant la somme de températures à atteindre pour arrêter la

²⁰ SommeT

campagne d'irrigation définit la date où le modèle déclenchera l'arrêt de l'irrigation. Cette figure montre qu'en 2003 cette date est avancée de 10 à 15 jours selon le groupe de précocité.

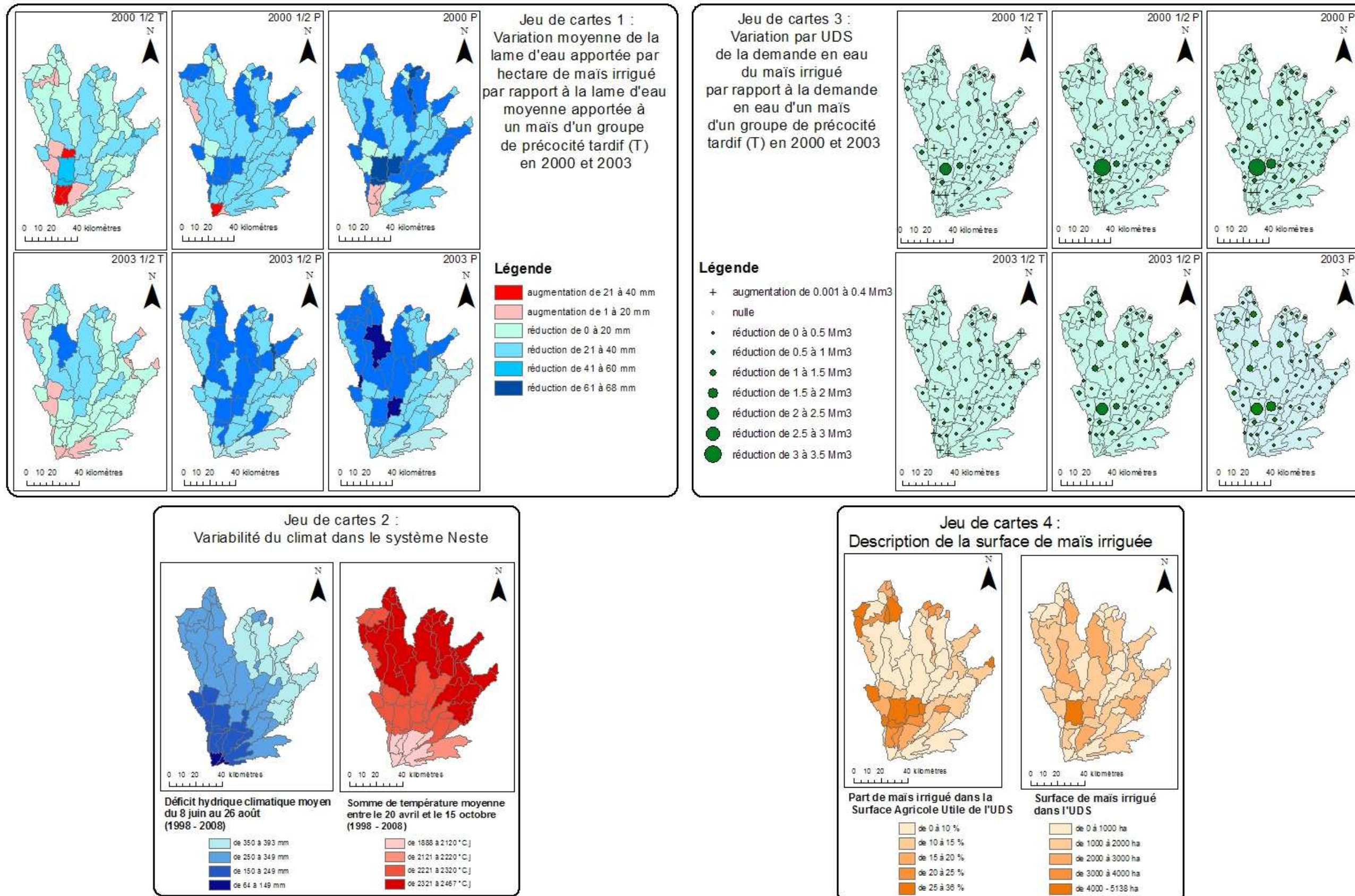
Figure 23 : Cumul des températures et des précipitations à la datation d'Auch les années 2000 et 2003



Les faibles précipitations observées en 2003, n'entraînent pas de réduction ponctuelle de la demande en eau comme par exemple la deuxième décade de juillet 2000. Cette réduction s'explique, à la station d'Auch par un cumul de précipitations de 30 mm durant cette décade. Pour déclencher un retard de l'irrigation le modèle doit comptabiliser plus de 10 mm de précipitations sur les cinq jours précédant la date de l'apport. La Figure 23 montre que cette situation ne s'est pas présentée à Auch en 2003 entre le 1^{er} juin et le 12 août. Il en résulte une demande en eau d'irrigation plus forte l'année 2003 pendant toute cette période.

Si la réduction de la demande en eau est effective au niveau du système Neste, elle ne l'est pas toujours localement. La Figure 24 présente quatre jeux de cartes. Le premier jeu représente la variation moyenne de la lame d'eau apportée par hectare de maïs pour chaque groupe de précocité alternatif par rapport à un groupe tardif semé la même année : la lame d'eau estimée pour les scénarios 1/2 T, 1/2 P et P de l'année 2000 est comparée à la lame d'eau estimée pour le scénario T de l'année 2000. La réduction de la lame d'eau apportée semble dépendre de la distribution du climat qui est représentée dans le jeu de cartes 2 de la Figure 24. Les UDS où la lame d'eau n'est pas réduite se situent majoritairement dans des zones où le déficit hydrique climatique pendant la campagne d'irrigation est inférieur à 250 mm et où la somme de température pendant le cycle de la culture est inférieure à 2320 °C.j. De la même

Figure 24 : Evaluation des scénarios de l'application 1 par UDS



manière, les réductions des lames d'eau apportées au maïs irrigué sont plus prononcées sur une année sèche (2003) que sur une année normale (2000).

Le jeu de carte 3 (cf. Figure 24) représente la variation de la demande en eau d'irrigation entre les différents scénarios et le scénario T. Il permet d'identifier deux UDS pour lesquelles le changement de précocité aura un impact plus fort sur la demande en eau d'irrigation du maïs : les UDS 3 et UDS 25.

IV.3.2.4. Discussion

Ce jeu de scénarios vérifie l'hypothèse à l'échelle du système Neste que le semis de variétés plus précoces génère une réduction de la demande en eau d'irrigation. Cependant, la variation de la demande en eau est hétérogène dans le territoire. Dans certaines UDS, la demande en eau d'irrigation augmente. Nous pouvons imaginer que si des économies d'eau sont réalisées sur l'ensemble du territoire, ces économies pourraient être redistribuées dans les zones pénalisées par un changement de précocité. Il faut pour cela, vérifier que les agriculteurs dont la demande en eau augmente ont accès au réseau CACG. Si ces agriculteurs n'ont pas accès à ce réseau, un scénario pourrait être de demander aux agriculteurs dépendant du réseau CACG de préférer des variétés de maïs plus précoces.

Si la réduction de la lame d'eau semble facile à interpréter, celle du volume total d'eau économisé semble plus difficile : il dépend non seulement de la lame d'eau économisée, mais aussi de la surface de maïs irrigué dans l'UDS (cf. Figure 24, jeu de cartes 4). Cette dernière est fonction de la SAU de l'UDS et de la part de maïs irrigué dans la SAU de l'UDS. Or l'observation de la part de maïs irrigué dans la SAU de l'UDS montre qu'il existe d'autres UDS que les UDS 3 et UDS 25, où la surface de maïs irriguée est supérieure à 20 % de la SAU. Seulement, ces UDS ont de petites surfaces. Bien que l'irrigation y soit très présente, elles ont peu d'impact sur la réduction de la demande en eau d'irrigation du territoire. De plus la variation de la lame d'eau qui y est observée avec des variétés plus précoces n'est pas toujours une réduction (notamment dans le Nord-Ouest).

Ce jeu de scénarios montre que la lame d'eau économisée en choisissant des variétés plus précoces est fonction du climat. Il montre aussi qu'à l'échelle du système Neste, les UDS 3 et UDS 25 présentent un fort potentiel pour économiser l'eau d'irrigation en jouant sur les choix de précocité du maïs.

IV.3.3. Application 2 : Combiner choix de précocité et date de semis

IV.3.3.1. Objectifs et hypothèses

Dans l'application 1, quel que soit le choix de précocité, le maïs est semé le 20 avril. Ce choix engendre une réduction de la demande en eau à la fin de la campagne d'irrigation, en août, au moment où la disponibilité de la ressource en eau pour les agriculteurs est plus rare (interdictions d'irriguer, restrictions, arrêtés municipaux, etc.). Cependant, la date de semis, elle aussi conditionne le déroulement de la campagne d'irrigation. Marquant le début du cycle cultural, cette date de semis conditionne non seulement les rendements, mais aussi le positionnement des prélèvements dans la campagne d'irrigation. Oweis et Hachum (2001) montrent que l'étalement des dates de semis va permettre de réduire le pic de demande en eau, en d'autres termes, d'étaler les prélèvements dans le temps. Dans cette application, l'objectif du jeu de scénarios est donc d'explorer la sensibilité de la demande en eau à la précocité du maïs semé et à la date de semis en construisant des scénarios plus cohérents par rapport les recommandations des instituts.

IV.3.3.2. Scénarios


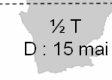


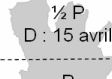
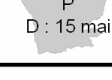
Les scénarios construits dans cette application sont présentés dans la Figure 25. Trois groupes de précocité et deux dates de semis sont considérés dans ces scénarios. Les groupes de précocités choisis sont le groupe tardif (T de référence) et les groupes mi-précoce ($\frac{1}{2}$ P) et précoce (P) pour marquer une rupture avec le groupe de référence, tardif. Maton (2006), montre que dans le secteur Baïse (au Sud du système Neste) les champs de semis observés s'étalent du 26 mars au 23 mai avec une augmentation des semis le 15 avril. Les dates de semis considérées dans ce jeu de scénarios sont choisies en conséquence : le 15 avril et le 15 mai.

Dans un premier temps, une situation référence est reconstruite (REF) dans laquelle des variétés tardives et mi-précoces sont semées selon les conditions climatiques de chaque UDS. La variété tardive qui est semée dans la situation de référence présentée précédemment nécessite une somme de $2\,120\text{ }^{\circ}\text{C.j}$ entre le semis et la récolte (cf. annexe 6). Cette somme de températures doit pouvoir être atteinte entre la date de semis et la date de récolte ce qui n'est pas le cas dans toute la zone, notamment au Sud. En conséquence, nous sélectionnons toutes les UDS dont la somme de températures moyenne²¹ (de 1998 à 2008) entre le 20 avril et le 15

²¹ $\sum_j T$

octobre est inférieure à 2 120 °C.j et le maïs irrigué tardif semé le 20 avril est remplacé par du maïs irrigué mi-précoce semé le 15 mai.

Figure 25 : Hypothèses et description quantitative des scénarios

Hypothèse	Scénario testé		
	Nom	systèmes de cultures	Facteurs de localisation
Les instituts techniques recommandent de raisonner le choix de la date de semis en fonction de la précocité	REF	 T D : 15 avril	$\sum_j T > 2120 \text{ °C.j}$
		 ½ T D : 15 mai	$\sum_j T < 2120 \text{ °C.j}$
Semer des variétés plus précoces réduit la durée du cycle de la culture donc la durée de la campagne d'irrigation	PRECO	 ½ P D : 15 mai	$\sum_j (ETP - P) > 250 \text{ mm}$
		 P D : 15 mai	$\sum_j (ETP - P) < 250 \text{ mm}$
Avancer la date de semis avance le pic de demande	SEMIS	 ½ P D : 15 avril	$\sum_j (ETP - P) > 250 \text{ mm}$
		 P D : 15 mai	$\sum_j (ETP - P) < 250 \text{ mm}$

Légende		
D : date de semis		
Variété semée		
T = Variété tardive = Cécilia	½ P = Variété Mi-précoce = DK300	P = Variété Précoce = LG 22

Dans un deuxième scénario (PRECO) l'hypothèse que le choix de variétés plus précoces va réduire le cycle de développement de la culture et donc réduire la durée de la campagne d'irrigation est reformulée. Le facteur de localisation mobilisé pour effectuer le choix du groupe de précocité n'est plus la somme de températures mais le déficit hydrique climatique²² subi par chaque UDS (représenté par la somme des précipitations moins la somme de l'évapotranspiration pendant la durée de campagne d'irrigation du scénario de référence, du 8 juin au 27 août). Etant donné que sur le système Neste, un maïs irrigué consomme entre 170 et 250 mm d'eau d'irrigation par an (Hurand, 2000), des maïs mi-précoces (½ P) sont semés dans les UDS où ce déficit hydrique climatique est supérieur à 250 mm et des maïs précoces (P) sont semés dans les UDS où le déficit hydrique est inférieur à 250 mm. Les instituts recommandent de semer les variétés plus précoces plus tardivement. En conséquence nous effectuons un semis le 15 mai pour tous les maïs de la zone.

Dans un troisième scénario (SEMIS), l'hypothèse formulée est que l'avancement de la date de semis avance dans le temps les besoins en eau de la culture et permet ainsi de réduire la pression sur la ressource en eau au moment où elle est réduite (août). A partir de la distribution des systèmes de culture du scénario PRECO, la date de semis des maïs mi-

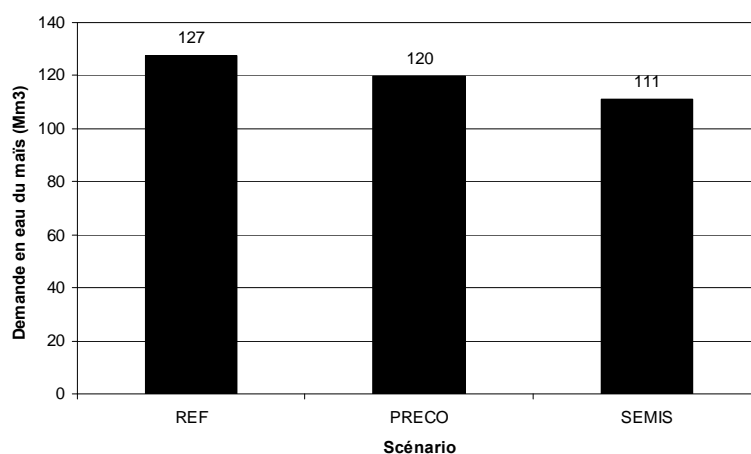
²² Somme journalière des précipitations soustraites des évapotranspirations : $\sum_j (ETP - P)$

précoces est avancée au 15 avril. La date de semis des maïs précoces est inchangée, le 15 mai : l'hypothèse est que les températures dans la zone sud du système Neste ne permettent pas des semis trop précoces.

IV.3.3.3. Evaluation

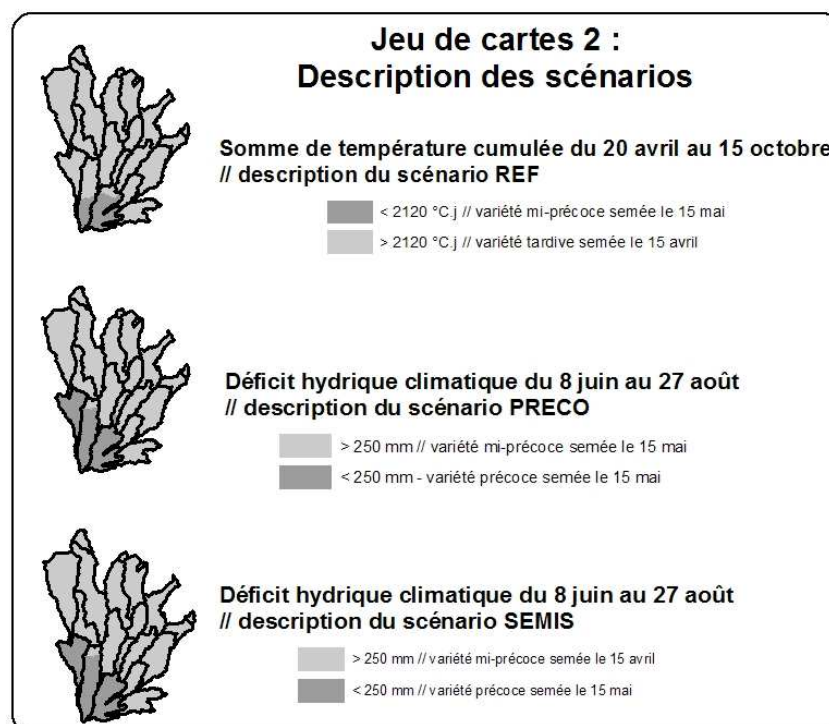
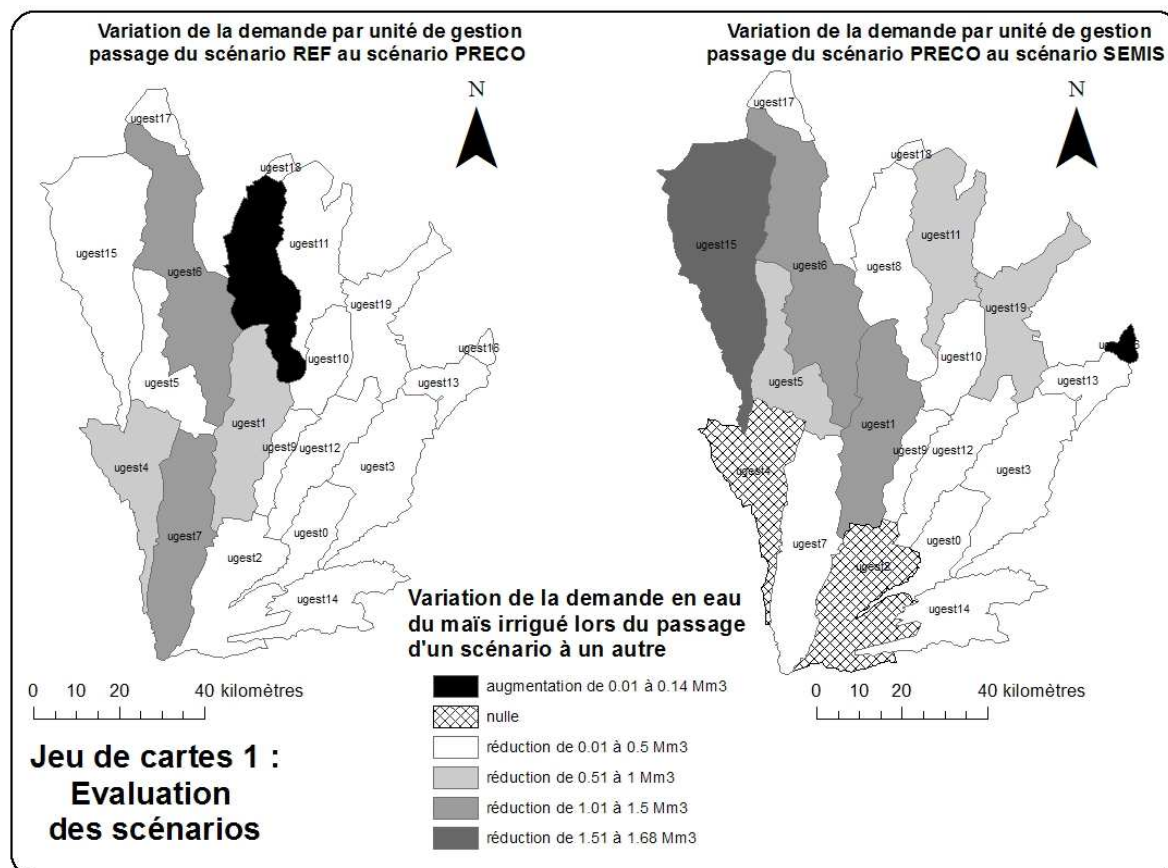
Nous avons évalué ces scénarios seulement pour l'année climatique 2003 qui a été marquée par une forte sécheresse. Comme le montre la Figure 26, à l'échelle du système Neste, les deux scénarios PRECO et SEMIS indiquent une réduction de la demande en eau d'irrigation par rapport au scénario REF. La demande en eau d'irrigation totale est estimée à 127 Mm³ pour le scénario REF, à 120 Mm³ pour le scénario PRECO et à 111 Mm³ pour le scénario SEMIS.

Figure 26 : Demande en eau du maïs irrigué sur le système Neste pour les scénarios REF, PRECO et SEMIS



La Figure 27 présente l'évaluation et la description des scénarios REF, PRECO et SEMIS par Ugest et sur la totalité de la campagne d'irrigation. La variation de la demande en eau d'irrigation estimée entre les scénarios REF et PRECO puis entre les scénarios PRECO et SEMIS montre que le changement de précocité combiné à une modification de la date de semis occasionne un impact hétérogène au niveau du territoire. Nous constatons d'abord que la variation de la demande en eau (entre les scénarios PRECO et SEMIS) des Ugest est nulle. Cette variation (nulle) s'explique. Dans les deux scénarios (PRECO et SEMIS), des variétés précoces de maïs ont été semées le même jour (le 15 mai, cf. Figure 27, jeu de cartes 2).

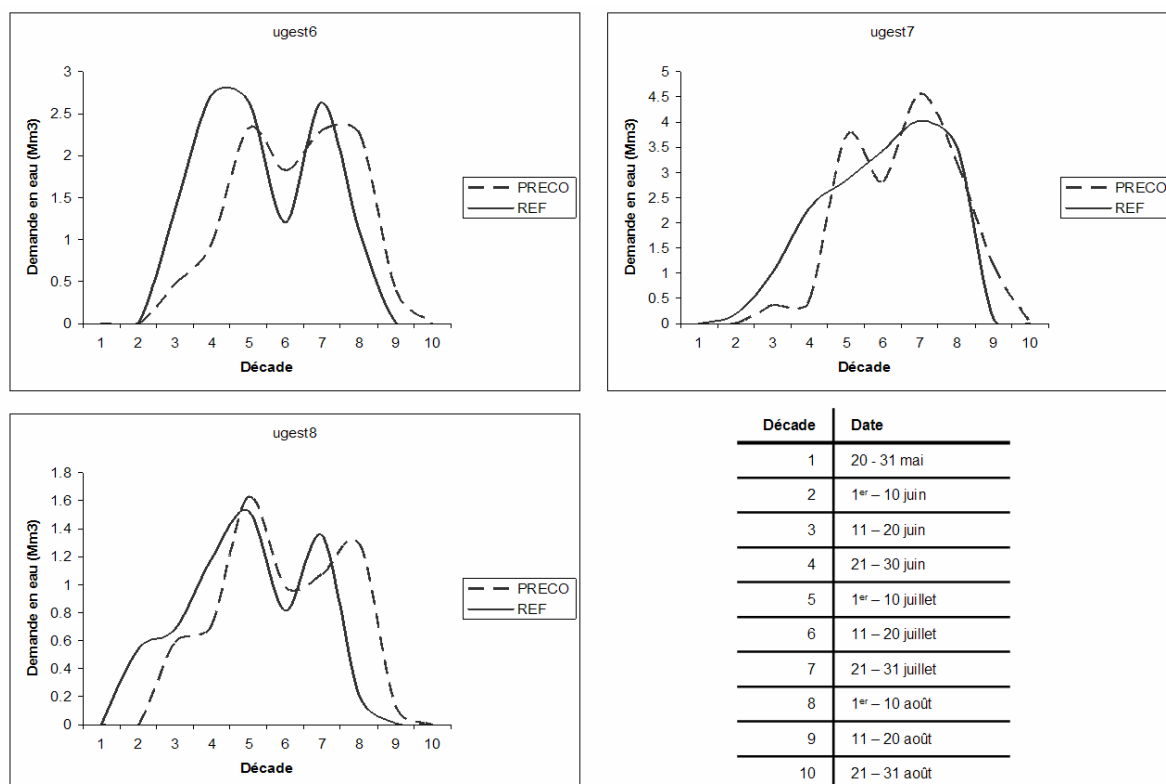
Figure 27 : Evaluation et description des scénarios REF, PRECO et SEMIS par Ugest



De manière générale, le semis tardif (15 mai) d'une variété plus précoce (mi-précoce ou précoce) réduit la demande en eau d'irrigation. Cependant, cette réduction est inférieure à celle générée par la culture d'une variété plus précoce semée le même jour : dans cette application, la réduction maximale de la demande en eau d'irrigation pour 2003 est estimée à 1,68 Mm³ pour l'Ugest 6 (cf. Figure 27), alors que dans l'application précédente, la réduction maximale est estimée à 2.3 Mm³ pour la seule UDS 25 (scénario ½ P évalué en 2003).

C'est dans les Ugest 6 et 7 que le passage du scénario REF au scénario PRECO a généré une plus forte réduction de la demande en eau (cf. Figure 28). Dans l'Ugest 8, le choix d'une variété mi-tardive semée le 15 mai entraîne une très faible augmentation de la demande en eau de 0,07 Mm³. La comparaison de la distribution des prélèvements par décade à l'échelle de ces Ugest (cf. Figure 28) montre que, quel que soit l'impact du scénario sur la variation de la demande en eau, le choix d'une variété plus précoce se traduit par une baisse de la demande en eau en début de campagne étant donné que les maïs mi-précoces ont été semés plus tardivement.

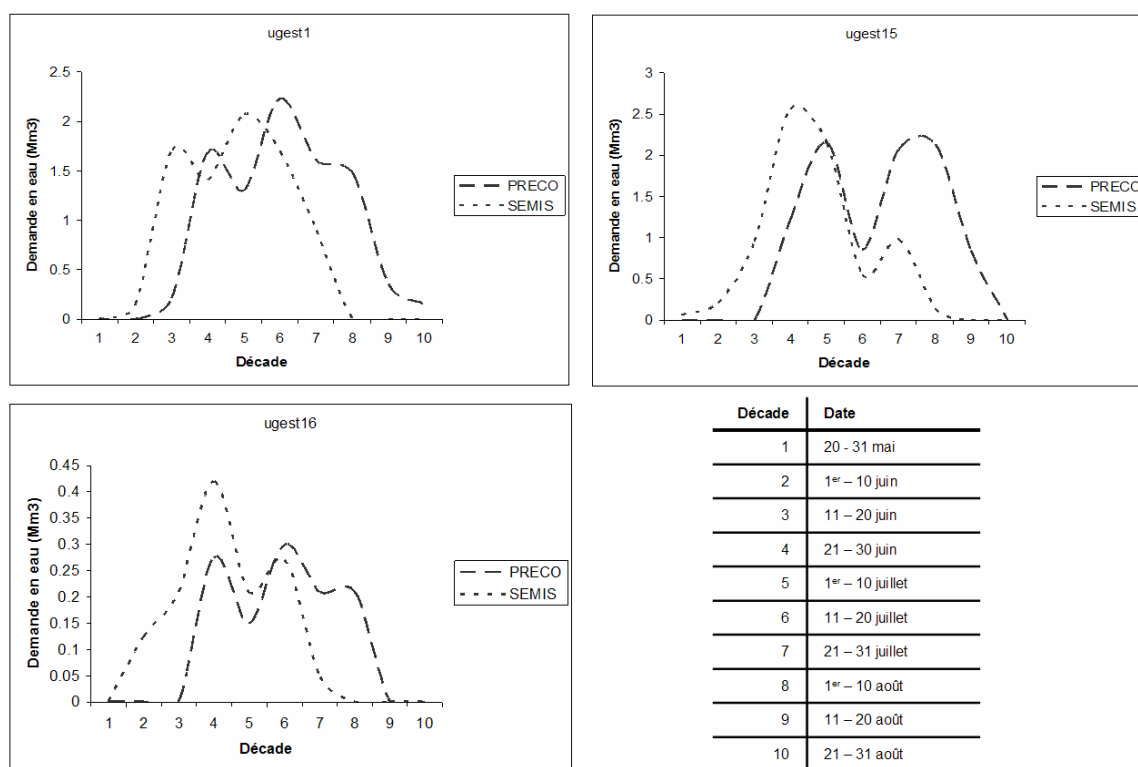
Figure 28 : Prélèvements d'irrigation cumulés par décade dans les Ugest 6, 7 et 8 pour les scénarios REF et PRECO



L'avancement de la date de semis des variétés mi-précoces dans les UDS où le déficit hydrique climatique est supérieur à 250 mm (cf. Figure 27) se traduit par une réduction de la demande en eau.

C'est dans les Ugest 1 et 15 que ce passage du scénario PRECO au scénario SEMIS a généré une plus forte réduction de la demande en eau (cf. Figure 29). Dans l'Ugest 16, l'avancement de la date de semis entraîne une très faible augmentation de la demande en eau de 0,14 Mm³. La comparaison de la distribution des prélèvements par décade à l'échelle de ces Ugest (cf. Figure 29). Montre que, quel que soit l'impact du scénario sur la variation de la demande en eau, le choix d'une variété plus précoce se traduit par un avancement du pic de demande.

Figure 29 : Prélèvements d'irrigation cumulés par décade dans les Ugest 1, 15 et 16 pour les scénarios REF et PRECO



IV.3.3.4. Discussion

Avancer la date de semis permet d'avancer le pic de demande en eau. Cette technique est appelée technique de l'esquive (Levy et al., 2005 ; Debaeke et al., 2006). Il existe deux stratégies d'esquive : l'esquive partielle et l'esquive totale. L'esquive partielle consiste à semer précocement (c'est-à-dire fin mars – début avril) des variétés tardives. L'esquive totale consiste à semer précocement des variétés précoces. Le scénario SEMIS peut donc être considéré comme un scénario d'esquive totale. Il est adapté à des régions sujettes à restrictions comme le système Neste. Cette technique est diffusée auprès des agriculteurs²³ en en présentant des atouts comme l'assurance d'une récolte précoce qui confère une meilleure

²³ www.web-agri.fr/dossier-special/Variete-Mais-2009/

qualité sanitaire à cette récolte ou la diminution des coûts de séchage grâce à des taux d'humidité des grains des variétés précoces inférieurs à ceux des variétés tardives. Cependant, une évaluation des rendements issus de ce scénario est indispensable pour juger de sa pertinence.

IV.3.4. Application 3 : Vers une substitution du maïs irrigué par une rotation blé dur / tournesol valorisée par des apports d'eau

IV.3.4.1. Objectif et hypothèses

L'objectif de ce dernier jeu de scénarios est de construire un avenir probable de la distribution des systèmes de culture du système Neste. Il y a quelques années (au moment du débat de Charlas), le scénario proposé ici aurait apporté une solution pour réduire la demande en eau d'irrigation. Il aurait dessiné un avenir souhaité. Aujourd'hui, avec l'évolution des politiques agricoles et le réchauffement climatique, il apparaît comme probable. La superficie de maïs irrigué en France, et notamment dans le Sud-Ouest, affiche un net recul depuis 2000. Plusieurs forces de changement peuvent expliquer ce recul. Agreste (2007) met en avant le risque de sécheresse. Les quatre sécheresses successives observées de 2003 à 2006 ont modifié les comportements des agriculteurs. Buisson (2005) décrit les effets du découplage partiel ou total des aides à l'irrigation de la réforme de la Politique Agricole Commune de juin 2003 sur les surfaces irriguées et la demande en eau d'irrigation. Elle prévoit un recul de la superficie irriguée variant entre 13 et 23 % selon un découplage partiel ou total des aides à l'irrigation et une hausse ou non des prix du maïs. Pour tirer ces conclusions, elle utilise des modèles de comportement économique optimum des exploitants. Pour estimer la demande en eau d'irrigation résultant de ces scénarios, elle utilise des relations linéaires reliant la surface à la consommation en eau pour chaque culture.

Elle n'indique cependant pas où va être supprimée la surface irriguée ni par quels systèmes de culture elle va être remplacée. Parallèlement au repli des surfaces de maïs irrigué, on observe une augmentation de la surface de blé dur. C'est une culture méditerranéenne adaptée à la région Midi-Pyrénées. Des échanges avec des experts agronomes (INRA, Chambre d'agriculture) ou gestionnaires de l'eau (Agence de l'eau) confirment cette tendance. En revanche, la perte de rendements induite par une monoculture de blé dur n'est pas négligeable, et étant donné le découplage des aides, ce type de pratique a peu de chances de

voir le jour. En Midi-Pyrénées, 50 % du blé dur est cultivé en rotation avec du tournesol en 1997 (Debaeke et al., 2006).

Un scénario probable serait donc la substitution de 15 % du maïs irrigué par une rotation blé dur / tournesol. Etant donné que cette substitution a lieu sur la sole irrigable, nous pouvons imaginer que la rotation blé dur / tournesol serait valorisée par quelques apports d'eau en cas de stress hydrique. Les brouillards et alluvions étant fortement valorisées par l'irrigation, nous faisons donc l'hypothèse dans ce scénario que la substitution est plus facile (instinctive) dans les terreforts où l'irrigation est plus difficile. De la même manière, nous faisons l'hypothèse que les exploitations où le rapport SI/SAU est inférieur à 20 % n'ont pas fait d'investissement massif dans du matériel d'irrigation, et pourront très bien le revaloriser par l'irrigation du blé dur et du tournesol.

IV.3.4.2. Scénario

La construction d'un scénario où une monoculture est remplacée par une rotation est désormais possible. En effet, depuis l'article présentant SPACSS, l'outil a évolué et il est possible de substituer une culture par une rotation dans la mesure où la proportion d'une culture substituée par n autres est respectée au niveau de chaque exploitation (cf. section IV.2).

Dans cette partie, nous ne construisons qu'un scénario dans lequel nous substituons le maïs irrigué par une rotation blé dur irrigué / tournesol irrigué dans les exploitations situées en terreforts et dont le rapport SI/SAU est inférieur à 20 %. Ce scénario s'appelle BT. L'irrigation du tournesol est effectuée, si besoin, en deux apports de 35 mm : le premier juste avant la floraison ($\sum_j T$ depuis le semis = 800 °C.j), et le second environ un mois après ($\sum_j T$ depuis le semis = 1 100 °C.j). L'irrigation du blé dur est effectuée, si besoin, en un apport de 25 mm : à la floraison ($\sum_j T$ depuis le semis = 800 °C.j).

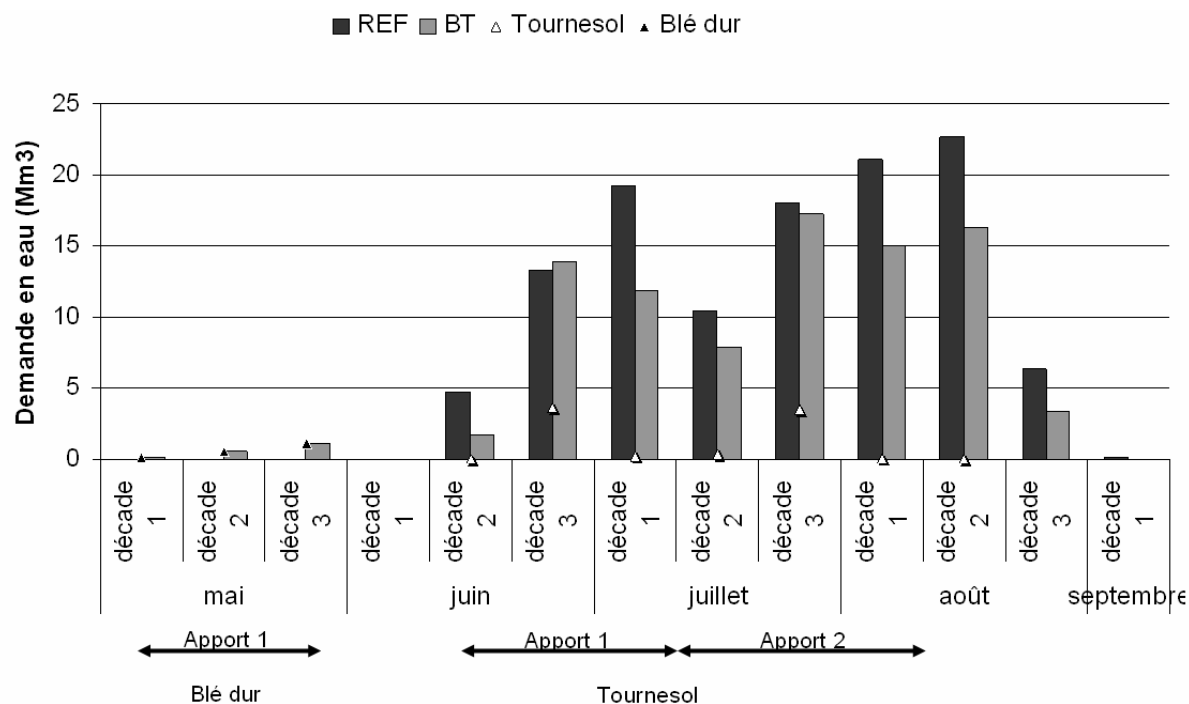
IV.3.4.3. Evaluation

Le scénario BT a été évalué pour l'année 2000 et comparé à la situation de référence appelée REF²⁴. A l'échelle du système Neste, la surface de maïs substituée en rotation blé dur / tournesol irrigués s'élève à 10 500 ha, soit 14 % de la surface irriguée totale du système Neste (77 100 ha) et 16 % de la surface de maïs irrigué totale. La réduction de la demande en eau générée par la substitution s'élève à 27 Mm³, soit 23 % de la demande en eau toutes cultures confondues de la situation de référence (116 Mm³).

²⁴ Ce scénario REF représente le scénario T évalué en 2000 de l'application 1.

Cette réduction n'est pas homogène au cours de la campagne. La Figure 30 présente la distribution des demandes en eau d'irrigation cumulées par décades des scénarios REF et BT, du tournesol irrigué dans le scénario BT et du blé dur irrigué dans le scénario BT. Cette figure montre par des flèches doubles l'étalement des périodes d'irrigation du blé dur et du tournesol dans le scénario BT. Pendant ces périodes, pour le tournesol, on observe deux pics de demande en eau : pour l'apport 1 pendant la décade 3 du mois de juin, pour l'apport 2 pendant la décade 3 du mois de juillet. Pendant ces décades, l'écart entre la demande en eau des scénarios REF et BT est amoindri. On observe même que, pendant la décade 3 du mois de juin (qui correspond à la floraison du tournesol), c'est la demande en eau du scénario BT qui est supérieure à celle du scénario REF.

Figure 30 : Distribution de la demande en eau d'irrigation cumulée par décades, de la situation de référence (REF), du scénario BT, du tournesol irrigué dans le scénario BT et du blé dur irrigué dans le scénario BT

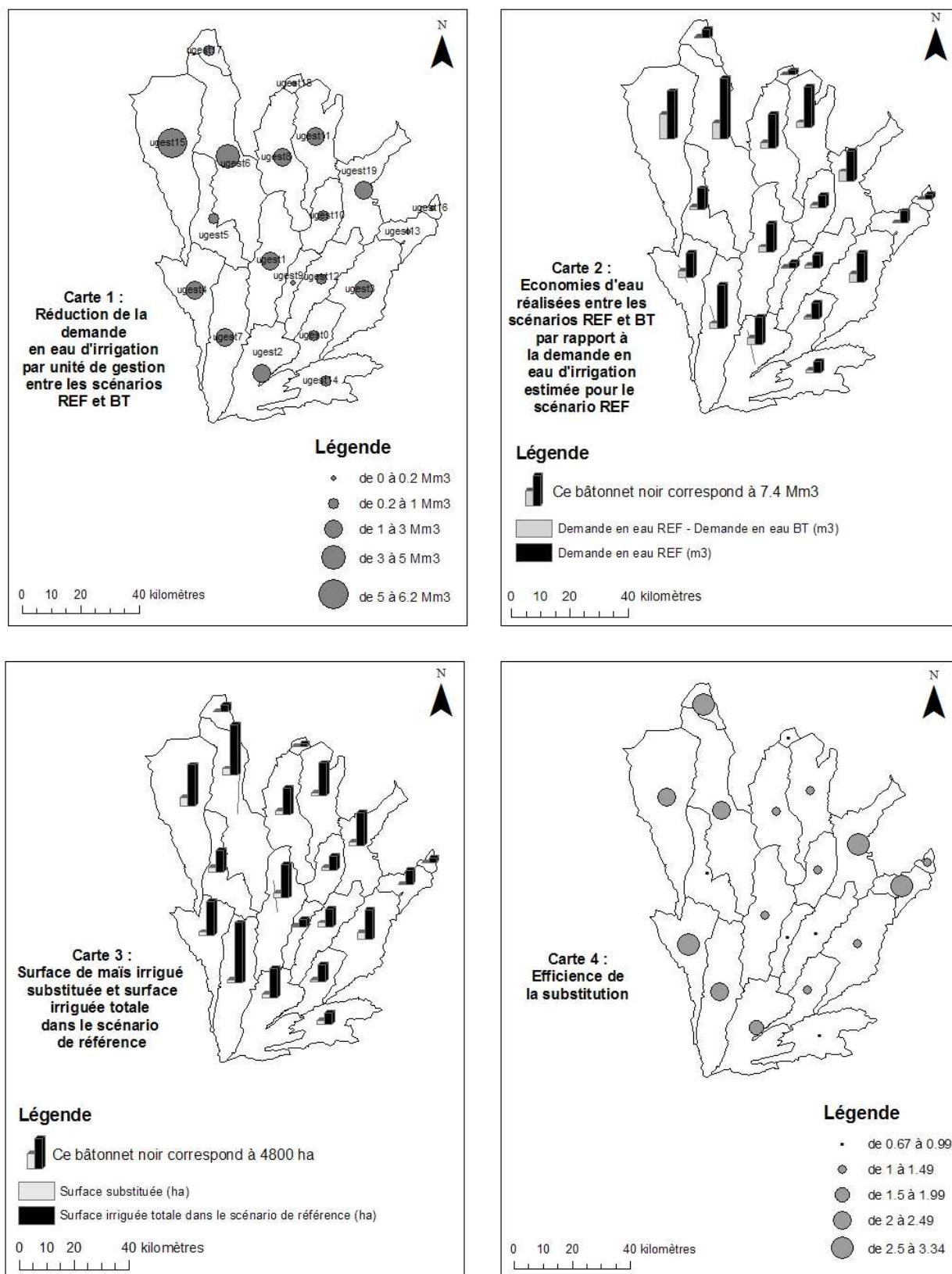


La Figure 31 présente l'impact de la substitution du maïs irrigué dans les terreforts des exploitations dont le ratio SI/SAU est inférieur à 20 % par Ugest. La carte 1 montre que la réduction de la demande en eau par Ugest varie de 0 Mm³ dans l'Ugest18 à 6,2 Mm³ dans l'Ugest 15. La carte 2 montre, sous la forme d'histogrammes, la part de cette économie réalisée par rapport à la demande en eau totale simulée pour la situation de référence (REF). Cette part est aussi variable selon les Ugest : elle varie de 0 % dans l'Ugest16 à 53 % dans l'Ugest 15. Ce constat incite à penser que cette part de l'économie d'eau réalisée par rapport à la demande totale en eau simulée pour la situation de référence (REF) est proportionnelle à la

surface de maïs irrigué substituée par rapport à la surface totale de maïs irrigué dans la situation de référence (REF). La carte 3 présente en conséquence sous forme d'histogrammes la part de la surface de maïs irrigué substituée et la surface irriguée totale de chaque Ugest dans la situation de référence (REF). De manière générale, cette part apparaît comme inférieure à la part de l'économie d'eau réalisée par rapport à la demande totale en eau du scénario de référence. C'est d'ailleurs ce que nous observons à l'échelle du système Neste (réduction de la demande en eau de 23 % pour une surface substituée de 16 %). Cette part varie de 0 % dans l'Ugest 16 à 32 % dans l'Ugest 14. Pour illustrer l'efficacité de cette substitution, la carte 4 présente la distribution par Ugest du ratio de la part de l'économie d'eau réalisée sur la part de la surface de maïs irrigué substitué. Cette efficacité varie de 0,67 dans l'Ugest 14 à 3,34 dans l'Ugest 17 ce qui signifie (1) que dans l'Ugest 14, la part de l'économie d'eau réalisée par rapport à la demande en eau totale de la situation de référence REF est inférieure à la part de la surface substituée par rapport à la surface irriguée totale de la situation de référence (REF) et (2) que dans l'Ugest 17, elle est 3,34 fois supérieure. Dans les Ugest 8 et 16, cette efficacité est égale à 1. Dans l'Ugest 8, la part de l'économie d'eau réalisée par rapport à la demande en eau totale dans la situation de référence REF s'élève à 0,17. Elle est égale à la part de la surface substituée par rapport à la surface irriguée totale de la situation de référence (REF). Dans l'Ugest 16, la surface substituée est nulle, il en résulte une économie d'eau nulle et une efficacité égale à 1. L'observation des cartes 2 et 3 laisse penser que l'efficacité de la substitution est plus forte dans l'Ugest 15. Dans la carte 4, cette efficacité n'apparaît que dans la deuxième catégorie (de 2 à 2,49). En réalité, l'efficacité de la substitution dans l'Ugest 15 s'élève à 2,49, ce qui positionne l'Ugest 15 à la limite supérieure de la deuxième catégorie.

La plus grande économie d'eau réalisée se situe dans l'Ugest 15 où la surface de maïs substituée par une rotation blé dur tournesol irrigués est la plus grande. En revanche, ce n'est pas dans cette Ugest que l'efficacité de la substitution est la plus grande. Ce scénario bien qu'il soit exploratoire, aurait pu être envisagé de manière normative lors du débat de Charlas. Dans son évaluation, ces deux types d'indicateurs auraient du être présentés. L'analyse de la variabilité spatiale de l'efficacité de la substitution aurait pu emmener des porteurs d'enjeux à remettre en cause le scénario et à proposer, par exemple de ne réaliser cette substitution que dans les Ugest où l'efficacité est supérieure à 1.

Figure 31 : Comparaison du scénario BT à la situation de référence (REF) par Ugest



IV.3.4.4. Discussion

Dans cette application, une seule évolution possible de la distribution des systèmes de culture est envisagée à partir d'une revue bibliographique et de dires d'experts. La revue bibliographique effectuée en section I.2.1.5, suggère, en approche exploratoire, de comparer un jeu comportant plusieurs scénarios. Un autre scénario possible aurait été d'intégrer du sorgho à la rotation blé dur / tournesol. Cependant, la superficie de sorgho a été marquée par un net recul en 2003, lors du découplage des aides. En effet cette culture bénéficiait de la prime à l'irrigation et permettait ainsi de valoriser des petites réserves d'eau qui auraient été insuffisantes pour du maïs irrigué. En considérant les préoccupations environnementales croissantes des gouvernements et de l'opinion publique (le Grenelle de Environnement, Agriculture Biologique), il serait possible d'imaginer la substitution du maïs irrigué par des systèmes de culture biologiques irrigués. Dans cette application, nous avons fait le choix de ne considérer que les forces de changement Politique Agricole Commune et réchauffement climatique. Une seule évolution possible de chacune d'elles n'a été considérée : pour la Politique Agricole Commune c'est le découplage des aides à l'irrigation ; pour le réchauffement climatique, l'augmentation des sécheresses. Pour construire des scénarios exploratoires avec SPACSS il faudra donc prendre soin de définir une méthode pour identifier un jeu contrasté de forces de changement.

IV.3.5. Conclusion

La première application s'apparente à une approche scénario dont l'objectif serait une analyse de sensibilité de la demande régionale en eau à la précocité du maïs. Cet objectif des scénarios est accepté par Van Notten et al. (2003) ou Börjeson et al (2006).

La deuxième application reste une analyse de sensibilité dans laquelle un agronome intervient pour explorer la sensibilité de la demande régionale en eau à des scénarios, non plus construits de manière systématique (comme dans l'application 1), mais de manière logique et raisonnée ; l'exploration d'un scénario justifiant l'exploration d'un autre. Ce type d'approche est très utilisé dans les exemples que nous avons décrit en chapitre I (e.g. Wechsung et al., 2000 ; Stolte et al., 2003 ; Münier et al., 2004 ; Wang et al., 2008). Il démontre bien le caractère itératif de la construction et l'évaluation de scénarios.

Dans la troisième application, l'objectif est de construire une distribution des systèmes de culture probable. A partir de discussions et de la bibliographie, nous construisons un discours

logique et possible portant sur les forces de changement et la distribution finale des systèmes de culture du système Neste. Cette approche s'apparente à celle de Palang et al. (2000) où les forces de changement comme l'état final du système sont exprimés de manière narrative, aucun modèle n'est utilisé pour simuler l'évolution de la distribution des systèmes de culture (Veldkamp et Fresco, 1997 ; Etienne et al., 2003 ; Van Meijl et al., 2006 ; Verburg et al., 2006 ; Westhoek et al., 2006) ou leur distribution finale (Van Meijl et al., 2006 ; Höll and Andersen, 2002 ; Dockerty et al. ; 2005).

Comme dans l'article présenté précédemment (cf. section IV.2), ces trois applications nous montrent la diversité des indicateurs que nous pouvons produire avec SPACSS à partir de la seule demande journalière en eau d'irrigation. Cette diversité soulève des questions comme la pertinence d'un indicateur pour juger de la pertinence d'un scénario normatif.

Ceci dit, l'originalité de cette section réside dans la présentation sous forme narrative (en phrases) des scénarios évalués à l'aide de SPACSS. Cette expression narrative s'appuie sur différents supports (diagrammes, cartes, chiffres) qui facilitent la compréhension des scénarios. Cette expression narrative des scénarios démontre le potentiel de l'outil à permettre de construire et d'évaluer des scénarios poursuivant des objectifs diversifiés.

CHAPITRE V. DISCUSSION GENERALE

L'objectif principal de ma thèse est de développer une méthode permettant, dans une approche scénario, de construire de manière narrative des scénarios portant sur la distribution des systèmes de culture d'un territoire et de les évaluer à l'aide d'un modèle calculatoire. Pour satisfaire cet objectif j'ai développé un outil (SPACSS). Dans une première section je reviendrai sur les choix que j'ai faits pour développer cet outil. Dans une deuxième section j'expliquerai dans quelle mesure cet outil me permet de répondre à ma question de recherche. Finalement, je conclurai sur les perspectives d'utilisation de cet outil avec les porteurs d'enjeux du système Neste.

V.1. Retour sur les choix faits pour développer SPACSS

Pour répondre à ma question de recherche, j'ai développé un outil. J'ai effectué des choix qui ont conditionné la construction et les performances de cet outil. Dans cette section je discute ces choix. Dans une première section je discute des indicateurs que j'ai définis pour évaluer les scénarios de systèmes de culture. Dans une deuxième, je reviens sur le choix effectuer de spatialiser un modèle bio-décisionnel pour évaluer les scénarios. Dans la troisième section, je discute des choix faits pour construire la situation de référence.

V.1.1. Les indicateurs d'évaluation

La gestion de l'eau comme la distribution des systèmes de culture concerne une multitude d'acteurs aux objectifs variés. Les critères qui peuvent être pertinents pour la planification d'une gestion spatiale de l'eau en territoire agricole sont donc multiples en nature (économiques, environnementaux, sociaux) et en nombre. Ils sont souvent conflictuels. Des méthodes, appelées multicritère, permettent de définir des solutions à des problèmes où plusieurs objectifs, souvent contradictoires, doivent être pris en compte. Elles permettent de prendre en compte différents critères de manière à prendre in fine une décision (par exemple en les agréant ou les pondérant selon les points de vue des différents acteurs). Il existe plusieurs méthodes multicritère pour évaluer les systèmes de culture : Dialecte (Solagro, 2009) ou MASC (Sadok et al., 2009) en sont deux exemples. L'utilisation de telles méthodes nécessite l'estimation, au préalable, d'indicateurs élémentaires diversifiés et quantifiés.

C'est le choix des indicateurs qui détermine les méthodes utilisées pour estimer ces derniers. Pour traiter des questions relatives à la gestion quantitative de l'eau dans le système Neste, j'ai pris le parti d'estimer la demande potentielle en eau d'irrigation résultant non seulement des besoins physiologiques des cultures mais aussi de décisions des agriculteurs, décisions reposant sur le contexte de leurs exploitations (équipement, orientation technico-économique, etc.). Cette demande potentielle ne considère pas les éventuelles interdictions d'irrigation ayant souvent lieu dans la région. Cet indicateur, la demande en eau d'irrigation, permet d'évaluer une partie de l'impact environnemental des scénarios. Il est pertinent pour des acteurs qui mettent en œuvre la gestion quantitative de l'eau et sa planification. En revanche il

ne l'est pas pour d'autres porteurs d'enjeux qu'un changement dans la distribution des systèmes de cultures pourrait affecter. La modification de la distribution des systèmes de culture peut par exemple affecter les rendements en avantageant certains agriculteurs au détriment d'autres. Elle peut aussi affecter la production globale de la zone d'étude. Afin de permettre un jugement objectif de l'impact des scénarios construits, nous avons décidé de prendre en compte un autre indicateur, le rendement, et de produire les indicateurs demande en eau et rendement à différentes échelles, depuis le type d'exploitation à la totalité du système NESTE.

Pour estimer ces indicateurs, j'ai choisi de spatialiser le modèle bio-décisionnel MO_uSTICS. Dans le paragraphe suivant, j'explique en quoi les difficultés liées à ce choix m'ont conduite à seulement vous présenter l'estimation de la demande en eau d'irrigation dans cette thèse.

V.1.2. Spatialiser un modèle bio-décisionnel

Deux raisons m'ont conduite à choisir de spatialiser le modèle bio-décisionnel MO_uSTICS pour évaluer mes scénarios. MO_uSTICS comporte un modèle de culture dynamique (STICS, Brisson et al., 1998) qui permet de produire différents indicateurs (environnementaux, agronomiques et économiques) pour une grande gamme de cultures. MO_uSTICS comporte aussi un modèle qui représente la décision. Il permet ainsi d'estimer la demande en eau réelle des agriculteurs, et pas seulement le besoin en eau des cultures. La spatialisation de ce modèle permet de produire ces indicateurs à plusieurs échelles (parcelle, exploitation, territoire).

Dans une première section, je discute des problèmes soulevés par la simple utilisation d'un modèle de culture dynamique. Dans une deuxième et une troisième, nous verrons que l'évaluation de ce modèle pose des problèmes à l'échelle de la parcelle et à celle du territoire. Dans une quatrième je présente des solutions que je n'ai pas envisagées dans cette thèse.

V.1.2.1. Utiliser un modèle de culture dynamique

Les modèles de culture dynamiques et génériques comme STICS (Brisson et al., 1998), APES (Donatelli et al. (2004) ou APSIM (Mc Cown et al, 1996) présentent l'avantage de simuler la réponse d'un grand nombre de culture pour une large gamme de combinaisons sol – climat – itinéraire technique (Mavromatis et al., 2001 ; Semenov et al., 2009). Cependant, leur utilisation nécessite pour chaque culture un lourd travail de choix d'options de modélisation et un ajustement des paramètres en conséquence.

Les options de modélisation correspondent à différents formalismes qu'il convient de définir pour chaque culture. Par exemple dans STICS, il est possible de définir si l'indice de récolte sera calculé en fonction d'une somme de températures ou d'un nombre de jours.

En fonction de l'option définie, le modèle va mobiliser différents paramètres caractérisant la plante. Un paramètre est une valeur numérique qui n'est pas calculée par le modèle. C'est l'utilisateur du modèle qui doit la spécifier pour que le modèle soit adapté à son domaine d'application. Il peut choisir les valeurs par défaut fournies avec le modèle par le développeur, s'appuyer sur la littérature ou l'expérimentation pour définir une nouvelle valeur plus adaptée, ou rechercher cette valeur par optimisation. L'estimation des paramètres d'un modèle de culture est une tâche complexe car ces modèles contiennent plus de paramètres que de variables à simuler (Makowski et al., 2006). Ces difficultés justifient de vérifier la cohérence des données simulées, d'une part à l'échelle de la parcelle, puis à l'échelle de l'étendue considérée.

V.1.2.2. Evaluation à l'échelle de la parcelle

L'évaluation du rendement s'est avérée infructueuse à l'échelle de la parcelle. Une explication possible est l'utilisation de fichiers dont les paramètres ont été optimisés pour une autre version du modèle (version STICS.6 alors que nous utilisons STICS.5) pour des options prédéfinies. Ce constat nous amène à discuter de la complexité d'utilisation des modèles de culture. L'évaluation de la demande en eau s'est montrée plus robuste que celle du rendement. Les apports d'irrigation simulés sont cohérents avec les valeurs rencontrées dans la littérature technique (Hurand, 2000 ; Deumier et al., 2006).

Dans le modèle de décision MODERATO, les indicateurs déclenchant ou non l'accomplissement d'une activité (apport d'eau) sont la date, le stade de la culture, les précipitations ou l'état hydrique du sol. Le stade de la culture est représenté par la somme des températures cumulée par cette culture. Le formalisme déterminant la somme des températures cumulée par une culture peut être considéré comme robuste étant donné le nombre de modèles de cultures le mobilisant (pour n'en citer que deux Ritchie et al., 1998 ; Bouman et al. 1993). Les précipitations et la date sont des données d'entrée du modèle. La seule variable susceptible d'influencer la qualité de l'estimation de la demande en eau est la réserve hydrique du sol. En effet, son calcul dépend de paramètres de croissance de la culture (croissance foliaire, croissance racinaire) et de paramètres dépendant du sol (niveaux de conductivité hydraulique, etc). Cette variable n'est mobilisée que pour déclencher les irrigations au semis, en début de campagne et enfin à l'arrêt de la campagne. Un mauvais

paramétrage pourrait conduire à une mauvaise estimation des dates et réalisation de ces déclenchements. Cependant l'observation des déclenchements simulés montre que le modèle a un comportement cohérent :

- au semis et à l'arrêt l'irrigation ne sera pas déclenchée si des pluies significatives ont eu lieu ;
- pendant le campagne, le déclenchement d'un tour s'eau sera retardé si des pluies significatives ont eu lieu.

V.1.2.3. Evaluation à l'échelle du territoire

Une fois que seule l'estimation de la demande en eau est évaluée comme acceptable à l'échelle de la parcelle, l'évaluation du modèle spatialisé n'est possible que sur cet indicateur. De manière classique, l'évaluation d'un modèle s'effectue en confrontant les résultats du modèle à un jeu de données observées qui n'a pas servi au paramétrage dudit modèle (Klemes, 1986). Cette évaluation pose des problèmes de disponibilité des données observées. Elle s'est montrée impossible à l'échelle du système Neste car pour l'année 2000 (année dont je représente l'assolement), les données concernant les prélèvements en eau d'irrigation sont incomplètes et réparties entre l'Agence de l'Eau et la CACG de manière non exclusive.

Cette évaluation pose aussi des problèmes d'interprétation des écarts entre les valeurs simulées de la demande en eau et les valeurs observées. Nous avons pu évaluer la qualité des sorties de simulation sur une partie du système Neste : l'unité de gestion Baïse (Ugest 7, cf. annexe 5). Dans le cadre du projet ADEAUMIS, une courbe de référence reconstituant la demande en eau des irrigants du secteur Baïse a été construite à partir d'observations ponctuelles des prélèvements par la CACG et les consommations électriques journalières des stations de pompage des irrigants (Leenhardt et al., 2004, b). La demande totale en eau d'irrigation est estimée à 12,1 Mm³ à la fin de la campagne d'irrigation 2000 pour les agriculteurs prélevant dans le réseau de la CACG. Dans le cadre de ce projet, la demande maximale des irrigants prélevant dans des retenues collinaires (du secteur Baïse) est estimée à 3,4 Mm³. L'estimation simulée pour la situation de référence par la spatialisation de MO_uSTICS s'élève à 10,7 Mm³, soit un écart de 30% avec la demande de référence, ce qui n'est pas négligeable. Plusieurs interprétations sont possibles :

La date de semis : Dans la situation de référence, la date de semis de chaque culture est uniforme ;

La règle de décision de retour de l'irrigation : Dans le secteur Baïse, la majorité des sols sont des boubènes, pour lesquelles nous avons identifié une irrigation qualifiée de « précise » :

temps de retour entre deux irrigations très court (6 jour) et apport d'eau limité en conséquence (25 mm) (cf. section IV.1). Combinée avec la règle d'attente en cas de pluie qui tient compte des précipitations ayant eu lieu dans les 5 jours précédant l'irrigation, un temps de retour de six jours permet de tenir compte de toutes les précipitations ayant eu lieu entre deux tours d'eau et ainsi de s'approcher des besoins en eau de la plante ;

La distribution des exploitations pratiquant l'irrigation : Dans la procédure d'allocation nous avons affecté les exploitations irrigantes en priorités aux sols de type boulbène, sur lesquels le temps de retour entre deux irrigations est court.

J'ai tout de même utilisé MO_uSTICS pour évaluer la demande en eau d'irrigation des scénarios produits, j'y reviens dans les sections V.1.3.3 et V.2.2.2.

V.1.2.4. Conclusion

Le choix de spatialiser un modèle bio-décisionnel a montré ses limites, notamment sur l'estimation du rendement. Le recours à des modèles plus simples aurait facilité l'interprétation des écarts observés entre les données simulées et observées pour la situation de référence.

L'utilisation d'un modèle de culture ou d'un modèle bio-décisionnel n'est pas la seule solution calculatoire permettant d'évaluer les systèmes de culture (cf. Loyce et Wery, 2006). D'autres solutions existent et peuvent s'avérer plus simples et plus transparentes que l'utilisation d'un modèle bio-décisionnel. Pour estimer le rendement, nous aurions pu utiliser des fonctions de production comme celles développées par la FAO (Doorenbos, 1979) pour estimer le rendement en fonction de l'eau disponible (précipitations, irrigation, réserve utile, évapotranspiration) et la somme de température accumulée par la plante. Ce type de fonction semble approprié à l'évaluation de scénarios où seule l'eau est considérée comme facteur de production. Elle présente l'avantage d'être moins gourmande en paramètres et en options de simulation ce qui rend plus aisée l'interprétation d'une erreur dans l'estimation du rendement. Les fonctions de production sont moins coûteuses en termes de données d'entrée que les modèles de cultures dynamiques. Le recours à ce type de fonction aurait aussi facilité la caractérisation des données d'entrée du modèle pour la situation de référence. Cette caractérisation est un problème spécifique de la spatialisation de modèle. Je discute des choix que j'ai faits pour caractériser la situation de référence dans la section suivante.

V.1.3. Caractérisation de la situation de référence

Dans cette section, je reviens sur les choix que j'ai faits pour représenter la situation de référence (cf section IV.1) afin de pouvoir construire et évaluer des distributions de systèmes de culture alternatives à cette situation de référence. Cette discussion montre en quoi ma description de la distribution des systèmes de culture était nécessairement conditionnée par le choix que j'avais fait de spatialiser MO_uSTICS.

V.1.3.1. Représentation du système

Je représente le système que j'étudie (la distribution des systèmes de culture du système Neste) par un ensemble d'unités de support composées d'unités de simulation.

L'unité de support est la division du territoire la plus fine que j'ai choisie pour décrire de manière spatialement explicite la distribution des systèmes de culture. Les unités de support représentent des échelles intermédiaires entre l'unité de simulation et le territoire considéré. Elles représentent des portions de territoires significatives pour les gestionnaires de l'eau et de l'agriculture sur le système Neste. Elles sont composées d'unités de simulation qui ne sont pas spatialement explicites.

Les unités de simulation servent à la production d'indicateurs par MO_uSTICS. Elles représentent donc des unités homogènes en termes de données d'entrée du modèle. La perspective de construire et évaluer des scénarios nous oblige à attribuer une caractéristique supplémentaire à l'unité de simulation. En plus d'être homogène en termes de données d'entrées du modèle, il faut qu'elle le soit en termes de facteurs de localisation. En effet, il faut distinguer les situations potentiellement différentes après les changements opérés lors de la construction du scénario. Par exemple, il est nécessaire d'identifier deux unités de simulation même lorsque seul le type d'exploitation diffère (même système de culture, même sol, même climat) car un scénario peut conduire à la modification du système de culture dans l'un seulement des types d'exploitation.

Dans de nombreux travaux, et contrairement au cas présent, l'unité de simulation est spatialement explicite et ainsi confondue avec l'unité de support, citons par exemple Pontius et al. (2001) ou Angevin et al. (2008). La relation entre les unités de support et les unités de simulation est conditionnée par quatre facteurs :

- La superficie du territoire d'étude ;

- Les niveaux d'organisation spatiale pour lesquels les porteurs d'enjeux du territoire ont besoin d'information (échelle de décision), autrement dit les niveaux d'organisation spatiale auxquels l'outil doit produire de l'information ;
- La nature de l'information à produire et donc des processus représentés par le modèle (échelle des processus) ;
- La disponibilité des données d'entrée du modèle.

Les données nécessaires à la description des unités de support et des unités de simulation (données descriptives des facteurs de localisation et données d'entrée du modèle) sont en général dispersées au sein de différents organismes. En effet, leur acquisition relève de la responsabilité de différents instituts comme Météo France pour les données météorologiques, l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, ou la Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt pour les données sur les exploitations agricoles, etc. Chaque organisme a sa propre logique d'acquisition et d'organisation des données qu'il collecte : couverture spatiale, géoréférencement, choix des variables mesurées, etc. Il est donc nécessaire de procéder à des choix pour construire des unités de support et des unités de simulation qui mettent en relation ces données selon les besoins de l'étude.

Les facteurs de localisation que j'ai retenus pour construire et évaluer les scénarios de distribution de systèmes de culture sont les unités de gestion CACG, les PRA, le climat, le type de sol et le type d'exploitation. Les données nécessaires pour effectuer des simulations avec MO_uSTICS sont des données décrivant le type de sol, le climat, la culture et l'itinéraire technique.

V.1.3.2. Définition des unités de support et de simulation dans mon travail

Pour définir les unités de support et de simulation, j'ai utilisé deux procédures successives. La première consiste à découper le territoire en unités de support. La seconde consiste à distribuer dans ces unités de support des données pour construire des unités de simulation. Je procède à cette distribution de deux manières, soit en utilisant un SIG, soit en utilisant une règle de distribution.

Découpage en unités de support

J'ai choisi de baser la construction des unités de support sur les facteurs de localisation PRA et unité de gestion CACG, d'une part car elles représentent des niveaux d'organisation spatiale pour lesquels les porteurs d'enjeux du territoire ont besoin d'information, et d'autre part car l'estimation de la demande en eau d'irrigation ne nécessite pas de représenter de

processus de transfert tels que le ruissellement. L'unité de support est le résultat de l'intersection entre les PRA et les unités de gestion de la CACG. Les unités de gestion de la CACG sont des portions de bassin versant. Elles ont de la signification pour des acteurs tels que la CACG ou l'Agence de l'Eau qui traitent de la gestion quantitative de l'eau et dont les enjeux sont relatifs à des débits (débit d'étiage, débit minimum, débit de crise) (cf. section III.1.2.2). Ces acteurs mobilisent donc, dans leur tâche de gestion de l'eau, les unités de gestions CACG ou des compositions de celles-ci comme par exemple le bassin versant de la Baïse. La division en PRA a été choisie car elle correspond au niveau de perception des acteurs de la profession agricole (conseillers en irrigation). Les travaux de Mignolet (2008) montrent que cette division est toujours pertinente du point de vue des pratiques agricoles. Dans le système Neste, l'existence de projets de recherche centrés sur une PRA (Le Grusse et al, 2008) ou la constitution de communautés de communes regroupant les communes d'une PRA comme les Communauté de Communes du Bas-Armagnac²⁵ et « Cœur d'Astarac en Gascogne »²⁶ montrent que cette division est aussi représentative de la gestion des territoires. J'ai pu effectuer ce découpage parce que je disposais de données spatialement explicites décrivant les PRA et les unités de gestion CACG.

Distribution mobilisant un SIG

Je disposais également de données spatialement explicites pour caractériser la distribution des sols et du climat. J'explique dans ce paragraphe pourquoi, j'ai préféré ne pas les intégrer au découpage en unités de support et comment j'ai distribué les variables associées au type de sol et au climat dans les unités de support à l'aide d'un SIG.

Un découpage du territoire par types de sol aurait été nécessaire pour traiter de questions où les flux de matière étudiés sont dépendants du type de sol, par exemple, pour étudier les transferts vers une nappe phréatique recouverte par plusieurs sols (Ledoux et al., 2007). L'estimation de la demande en eau d'irrigation dans le système Neste ne nécessitant pas de prendre en compte ce type de processus, les sols ne sont pas spatialement explicités dans ce travail. En réalisant, à l'aide d'un SIG, une intersection entre les unités de support déjà définies et une carte des sols (CRAMP, 1993), j'ai simplement calculé la surface de chaque type de sol présent dans chaque unité de support.

Le découpage de la zone proposé par Météo France aurait également pu être pris en compte dans la division en unités de support. Ce découpage est une grille s'étendant sur l'intégralité

²⁵ www.cc-basarmagnac.fr

²⁶ www.coeur-dastarac.fr

du système Nete. Elle comporte 121 mailles de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ (soit environ 12,5 km x 12,5 km). Chacune de ces mailles est caractérisée en son centre par une série de données climatiques (ex. précipitations, température maximale, etc.) interpolée à partir de 12 stations climatiques. Les séries climatiques étant interpolées en fonction de leur distance aux 12 points d'observation, l'écart entre la série d'une cellule et celle de sa voisine est faible. La variabilité climatique au sein d'une unité de support peut donc être considérée comme faible. Pour éviter des calculs supplémentaires, j'ai préféré affecter une seule série de données climatiques à chaque unité de support, celle du point d'interpolation le plus proche du centre de gravité de l'unité de support (cf. annexe 5).

Distribution mobilisant une règle

Je n'ai pas choisie d'utiliser des données spatialement explicites pour caractériser les exploitations, les cultures et les itinéraires techniques associés et les distribuer à l'aide d'un SIG. J'ai donc défini des règles de distribution pour allouer les types d'exploitations aux types de sols, puis les cultures aux types d'exploitations, puis les itinéraires techniques associés à chaque culture en fonction des sols.

En ce qui concerne les exploitations agricoles, dans le RGA (Agreste, 2002) l'information spatialement explicite n'est disponible qu'au niveau de la commune. Je disposais d'information spatialement explicite décrivant la division en communes et j'aurais pu la prendre en compte pour le découpage en unités de support. Deux raisons m'ont conduite à ne pas utiliser cette division pour identifier les unités de support. (1) Schott et al. (2007) montrent que les parcellaires d'exploitations dont le siège est situé dans une commune donnée peuvent s'étendre bien au-delà des limites de cette commune. (2) Ne connaissant pas la localisation exacte des exploitations dans les communes, il m'est impossible d'associer les exploitations de ces communes aux types de sols présents sur ces mêmes communes. Ainsi, je n'ai pas retenu le découpage du territoire en communes pour le découpage en unités de support, j'ai préféré calculer la surface relative de chaque type d'exploitation dans chaque unité de support.

Les données issues du RGA ont permis de réaliser la typologie d'exploitation. Elles ne permettent cependant pas de caractériser la surface relative de chaque couple possible type de sol – type d'exploitation dans chaque unité de support. Avec l'aide d'un conseiller agricole (qualifié d'expert dans la section IV.1), j'ai défini une procédure d'allocation permettant, dans chaque unité de support en fonction du type de sol, de définir la surface des exploitations de chaque type (cf. section III.1.1) dans chaque type de sol (distribués auparavant).

Pour caractériser la proportion de chaque système de culture dans chaque type de sol de chaque unité de support, j'ai procédé en deux étapes. J'ai commencé par distribuer les cultures dans les exploitations puis distribué les itinéraires techniques associés.

Dans un premier temps, j'ai distribué les cultures. Dans le RGA, l'assolement de chaque exploitation est connu. J'ai pu caractériser un assolement moyen pour chaque type d'exploitation (cf. section III.1.1.3) distribués précédemment.

Dans un deuxième temps, j'ai identifié, à l'aide du même expert, des règles reliant l'itinéraire technique à la culture et au type de sol (cf. section IV.1). J'ai ainsi défini une procédure permettant d'affecter des itinéraires techniques aux combinaisons culture-sol identifiées précédemment.

Le choix d'avoir utilisé le RGA (Agreste, 2002) est discutable car l'accès à des données spatialement explicites concernant la distribution des exploitations et des cultures est possible. La déclaration des îlots et parcelles au Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une obligation des agriculteurs de la France entière depuis 2004. Comme le registre cadastral utilisé pour les déclarations PAC des agriculteurs, le RPG permet à chaque agriculteur de déclarer par îlot : l'ensemble de ses parcelles, des cultures qu'il y implante, et certains aspects techniques tels que l'irrigation. Cette déclaration s'effectue sur la base d'une photographie aérienne ensuite géoréférencée. Le recours aux données contenues dans le RPG nous aurait permis de décrire beaucoup plus finement la distribution des données d'entrée du modèle. Un croisement des parcelles géoréférencées avec la carte des sols aurait permis bien plus simplement de savoir quelles étaient les surfaces associées à chaque combinaisons sol-culture. L'existence du RPG ne remet pas pour autant en cause l'intérêt d'une procédure d'allocation car celle-ci permet de distribuer spatialement des données inexistantes, ou partielles, qu'elle qu'en soit leur nature. Ainsi, si j'avais disposé des données du RPG, j'aurais pu recourir à une procédure d'allocation pour affiner la description des systèmes de culture du territoire, par exemple en distribuant des informations non contenues dans le RPG, mais présentes dans les déclarations PAC (ex. travail du sol, fertilisation, protection des cultures).

V.1.3.3. Conclusion

Pour construire la situation de référence, je mets en relation dans les unités de support et de simulation, des variables décrivant les facteurs de localisation et les systèmes de culture. A chacune de ces variables est associé un jeu de données. Ces jeux de données permettent d'une part d'effectuer des simulations avec MO_uSTICS, et d'autre part de décrire des distributions alternatives de systèmes de culture. Cette construction mobilise trois types de procédures pour

caractériser les unités de simulation. L'utilisation de ces procédures dépend d'une part de la nature spatialement explicite ou non des données et d'autre part des objectifs de l'outil par rapport à ces données (simuler des processus spatialement explicites, permettre de construire et d'évaluer des scénarios à différents niveaux de perception). La spatialisation de MO_uSTICS pour la construction et l'évaluation de scénarios de systèmes de culture sur le système Neste est donc un exemple de mise en œuvre de ces procédures. Ces types de procédure pourront facilement être réutilisés pour construire des situations de références permettant (1) de construire des scénarios d'usages du sol sur d'autres territoires et (2) de les évaluer à l'aide d'autres modèles calculatoires.

V.2. Contribution à la construction et l'évaluation des scénarios d'usages du sol

Dans cette section j'explique dans quelle mesure je réponds à ma question de recherche. Dans une première partie j'explique comment l'outil que je propose permet effectivement de produire et d'exploiter des données narratives (discours) qui pourront être évaluées par un modèle calculatoire. Dans une deuxième partie, j'explique en quoi cet outil peut s'inscrire dans une approche scénario complète.

V.2.1. Un outil permettant de quantifier un discours narratif

V.2.1.1. Un outil qui contraint à quantifier un discours

Dans cette thèse, je m'intéresse à la conversion, en données d'entrées d'un modèle calculatoire, d'un discours narratif portant sur des distributions alternatives de systèmes de culture. Pour convertir le discours, je propose une interface (GUI-IN, cf. section IV.2). Cette interface est considérée comme un outil qui astreint l'utilisateur à quantifier son discours afin de pouvoir l'évaluer à l'aide d'un modèle calculatoire. Cette interface propose à cet effet un formalisme permettant (1) de définir un sous-ensemble d'une distribution de systèmes de culture de référence (cf. sections IV.1 et V.1.3) sur lequel aura lieu une modification des systèmes de culture et (2) de définir la nature de cette substitution de systèmes de culture. L'utilisation de cet outil comporte les 2 étapes suivantes :

- La première consiste à caractériser les facteurs de localisation permettant de sélectionner un sous-ensemble du territoire d'étude. Dans cette étape l'utilisateur choisit d'abord les facteurs de localisation qui l'intéressent, puis il les quantifie : il définit pour chaque facteur de localisation une valeur ou un ensemble de valeurs qui définiront le sous-ensemble. Par exemple, si un utilisateur a sélectionné le type d'exploitation dans l'étape précédente, il devra définir s'il veut effectuer un changement dans les exploitations qualifiées d'irriguées dans la typologie d'exploitation (cf. section III.1.1.3) ou s'il veut effectuer un changement dans les exploitations ou le rapport SI/SAU est supérieur à une valeur que lui-même définit. A l'issue de cette étape, un sous-ensemble du système étudié est sélectionné. Ce sous-ensemble correspond à un ensemble d'unités de simulation de la situation de référence. Il comporte plusieurs systèmes de culture.
- L'étape suivante consiste à identifier une substitution de systèmes de culture. L'utilisateur choisit d'abord un système de culture à supprimer parmi les systèmes de culture présents dans le sous-ensemble. Ensuite, il caractérise un système de culture de substitution :
 - Il choisit d'abord une culture ou plusieurs cultures de substitution : nous avons vu dans l'application 3 (cf. section IV.3) qu'une monoculture de maïs irrigué peut être remplacée par une rotation blé dur / tournesol dans la mesure où ces proportions sont respectées au niveau de l'exploitation. Elle peut aussi être remplacée par une monoculture de maïs dont l'utilisateur redéfinira les pratiques culturales associées.
 - Puis il définit les pratiques culturales associées à chaque culture, en l'occurrence des règles de décision : l'utilisateur peut par exemple modifier la précocité de la culture semée. Il peut aussi modifier le stade permettant de déclencher l'irrigation en définissant la somme de température cumulée de la plante associée au stade où il veut déclencher l'irrigation.

Ces choix permettent à l'interface de générer une situation alternative présentée sous la même forme que la situation de référence : un ensemble d'unités de support, composées d'unités de simulations.

V.2.1.2. Le problème de conversion

Cette interface résout le problème de conversion soulevé dans la section I.1.3.2 en rendant incontournable la quantification des distributions alternatives de systèmes de culture.

Néanmoins, elle suppose l'assimilation, par l'utilisateur, d'un grand nombre de connaissances qui lui permettront de correctement construire le scénario. Ces connaissances peuvent être relatives à la description de la situation de référence. Par exemple, dans la situation de référence, une seule valeur de la réserve utile²⁷ est associée à chaque type de sol : la réserve utile de ce type de sol pondérée sur sa surface. Il est possible définir une distribution alternative en fonction de cette valeur de réserve utile. Néanmoins la quantification de cette réserve utile par l'utilisateur suppose qu'il connait la manière dont a été calculée la réserve utile pour le scénario de référence. Ces connaissances concernent aussi le modèle calculatoire utilisé. Par exemple, dans le modèle de décision de MO_uSTICS, certaines décisions sont effectuées en fonction du stade de la culture. Ces stades sont traduits dans STICS et dans l'interface par des sommes de température. Pour qu'un utilisateur puisse modifier le stade déterminant une décision du modèle, il lui faudra connaître la somme de température équivalente. Même si la documentation de l'outil (à l'aide par exemple d'abaques précisant la somme de température associée à chaque stade de chaque culture (cf. annexe 6).ou d'illustrations décrivant la situation de référence) peut rendre possible la construction de scénarios par un utilisateur n'ayant pas construit cet outil, l'interprétation des scénarios risque de poser des problèmes de compréhension de la part de l'utilisateur trop peu armé pour analyser la réaction du modèle dans chaque unité de simulation et encore moins à des échelles supérieures.

V.2.1.3. Conclusion

Cet outil offre à l'utilisateur une opportunité de préciser son discours jusqu'à le quantifier pour pouvoir l'évaluer. Chaque facteur de localisation est associé à un jeu de données aussi mobilisables par l'utilisateur pour préciser son discours. De la même manière, l'outil permet à l'utilisateur de préciser un grand nombre de caractéristiques des systèmes de culture identifiées comme pertinentes pour la gestion quantitative de la demande en eau d'irrigation. On compte parmi ces caractéristiques la rotation, le choix de précocité, la date de semis, les stades de déclenchement ou d'arrêt de l'irrigation, le temps de retour entre deux irrigations et l'apport d'eau à chaque irrigation. Ainsi, cet outil permet de générer et d'évaluer des distribution alternatives de systèmes de culture pour un nombre élevé de porteurs d'enjeux qui pourraient avoir des points de vue différents sur la distribution des systèmes de culture à

²⁷ « La Réserve Utile du sol correspond à la capacité de rétention du sol : volume d'eau que le sol peut absorber. Elle est exprimée en mm ». www.dictionnaire-environnement.com

mettre en œuvre pour atteindre un objectif donné ou sur la distribution des systèmes de culture résultant d'un jeu de forces de changement s'exerçant sur le territoire.

Si le problème de conversion peut handicaper un porteur d'enjeu dans l'utilisation de cet outil, nous avons vu en section I.1.3.2 et I.1.3.3 qu'une collaboration entre l'utilisateur et le développeur permettrait d'éviter ce problème et ainsi de valoriser l'outil. C'est alors le développeur qui quantifie le discours des utilisateurs, ou qui joue le rôle de médiateur dans sa quantification. Pour jouer ce rôle il dispose de trois options. La première consiste en une traduction immédiate : certains jugements peuvent paraître qualitatifs mais être directement quantifiables par le développeur. Par exemple, si l'expression d'un stade par un utilisateur peut sembler un critère qualitatif. Dans la mesure où un stade (10 feuilles par exemple) est associé à une somme de température, il peut être mobilisé comme indicateur quantitatif par le développeur. La deuxième consiste à utiliser une méthode pour traduire un jugement qualitatif en jugement quantitatif. Dans la section I.1.3.2, je donne l'exemple de la fonction d'adhésion (Alcamo, 2008) qui permettrait par exemple de définir les valeurs de la réserve utile qui sont associées à l'expression par un utilisateur de sols à fortes réserves utiles. La troisième, aussi évoquée dans la section I.1.3.2, serait de co-construire avec l'utilisateur des règles permettant de traduire un jugement qualitatif en une valeur quantifiée d'une variable. Cette collaboration permet donc à l'utilisateur de d'apprécier les potentialités de l'outil. Elle est aussi pour le développeur une occasion d'améliorer l'outil. Dans le cas de SPACSS, elle pourrait permettre par exemple d'identifier un facteur de localisation non représenté ou un indicateur non-simulé. Il faudrait alors redéfinir la situation de référence et l'outil.

V.2.2. Utilisation de cet outil dans une approche scénario

Dans la section CHAPITRE II, nous avons vu que pour inscrire cet outil dans une approche scénario il faudrait caractériser d'autres éléments clefs des scénarios : au minimum la situation de référence et les impacts. La caractérisation de la situation de référence a été un préalable à la construction de l'outil présenté précédemment. Je reviens sur la méthode utilisée pour la caractériser dans une première section. Dans une deuxième section j'explique en quoi l'outil peut s'inscrire dans une approche scénario complète.

V.2.2.1. Situation de référence

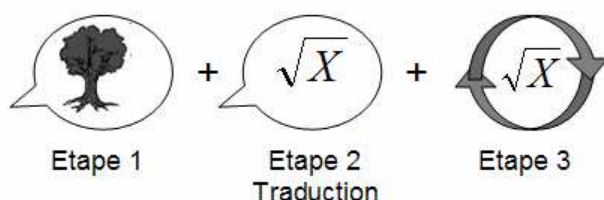
La méthode utilisée pour construire la situation de référence repose sur l'utilisation successive de trois procédures (cf. sections IV.1 et V.1.3.2) ce qui rend délicat son positionnement dans la grille que je propose pour classer les méthodes (cf. section I.1.3.2).

Les deux premières procédures (découpage en unité de support et distribution mobilisant un SIG) recourent à des données quantitatives spatialement explicites, et à l'utilisation d'un SIG pour reformuler un jeu de données quantifiées (unités de simulation). Les règles mobilisées pour reformuler ce jeu de données sont narratives : on peut les écrire sous forme de phrases. Je les décris d'ailleurs de manière narrative dans la section V.1.3.2. Elles pourraient aussi être remises en cause narrativement par les utilisateurs, nous avons donné des exemples dans la section V.1.3.2. Elles permettent à l'aide d'un SIG de construire de l'information quantitative. Pour la troisième procédure, j'utilise un support narratif (le discours d'un l'expert, cf. section IV.1) pour produire de l'information quantitative (un ensemble d'unités de simulation caractérisée par des variables décrivant les facteurs de localisation et les données d'entrée de MO_uSTICS). Mais cette procédure est composée de plusieurs étapes (cf. Figure 32.a/). La première étape recourt à un mode de construction narratif pour produire de l'information qualitative. La deuxième étape peut être considérée comme une traduction de ce discours qualitatif en discours quantifié. Dans la mesure où il est possible de décrire la matrice d'a priori (cf. section IV.1) sous forme littéraire, cette traduction à partir du discours qualitatif de l'expert peut être considérée comme narrative. La troisième étape recourt à l'utilisation d'un modèle numérique, la minimisation de l'entropie croisée (cf. section IV.1), pour produire de l'information quantitative. Finalement, définir cette méthode comme une méthode narrative produisant de l'information quantitative, pose un problème: cette qualification occulte le fait que j'ai eu recours à un modèle calculatoire. Ainsi, une méthode pour décrire un élément clef des scénarios peut alors être composée de plusieurs méthodes à mettre en œuvre à différentes étapes qui doivent être précisées.

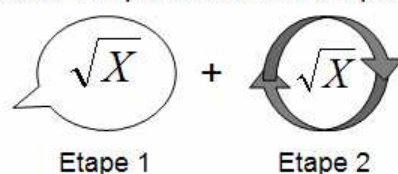
Une autre solution aurait été de remplir la matrice d'a priori avec l'expert. La méthode aurait alors comporté deux étapes (cf. Figure 32.b/). La première étape aurait été de construire une matrice d'apriori avec l'expert en utilisant méthode narrative et quantitative. La deuxième étape aurait consisté à utiliser un modèle calculatoire afin de décrire une distribution de systèmes de culture de manière quantifiée.

Figure 32 : Combinaisons de méthodes pour construire la distribution initiale des systèmes de culture

a/ Combinaison de méthodes utilisées pour construire la distribution initiale des systèmes de culture :



b/ Si nous avons rempli la matrice d'a priori avec l'expert :



V.2.2.2. Construction et évaluation de scénarios

Dans cette thèse, je présente la construction et l'évaluation de plusieurs jeux de scénarios (cf. section IV.3). Ce sont ces jeux de scénarios qui me permettent de démontrer dans quelle mesure l'outil peut s'inscrire dans une approche scénario. Dans cette section je reviens sur les éléments clefs des scénarios décrits dans ces applications ainsi que sur les bases de comparaison utilisées pour évaluer ces scénarios.

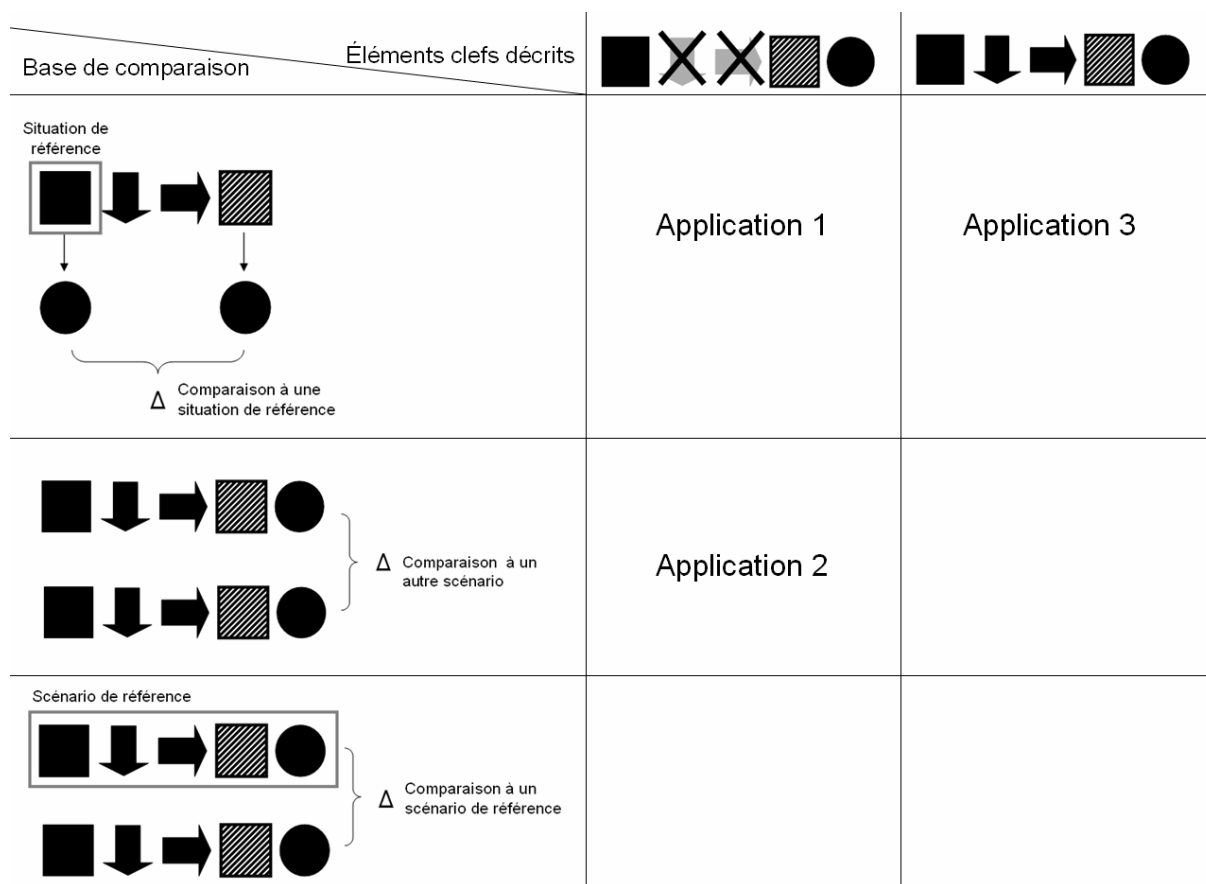
Dans les sections I.1.2.1 et I.2.1, je présente les éléments clefs des scénarios et des scénarios d'usages du sol. Dans les jeux de scénarios que je présente, je présente systématiquement la situation de référence. Elle a été un préalable à la construction de l'outil développé dans cette thèse. Je présente aussi systématiquement la situation finale et les impacts : l'objet de cette thèse est en effet de proposer une méthode narrative pour décrire quantitativement une situation finale du système dont je pourrai évaluer les impacts à l'aide d'un modèle calculatoire. Nous avons vu en section I.2.3.2 que la définition ou non des éléments clefs forces de changement et évolution du système est dépendante de la nature normative ou exploratoire des scénarios. A l'origine de la thèse se situe le débat de Charlas (cf. section 0). La question posée lors de ce débat suggère la construction de scénarios normatifs : Quelle distribution de systèmes de culture faut-il mettre en place pour économiser 50 Mm³ d'eau ? Nous avons donc, dans les applications 1 et 2 (cf. sections IV.3.2 et 0), développé des scénarios normatifs dans lesquels forces de changement et évolution du système ne sont pas décrits. En revanche, dans l'application 3 (cf. section IV.3.4), nous caractérisons de manière narrative les forces de changement et l'évolution du système. Cette caractérisation repose sur

une revue bibliographique, elle permet de faire des hypothèses sur la situation finale de la distribution des systèmes de culture. Nous pouvons qualifier cette approche d'exploratoire.

Les bases de comparaisons des scénarios d'usages agricole du sol ont été présentées dans la section I.2.4. A l'origine de l'étude, j'avais défini la situation de référence comme base de comparaison. L'estimation de la demande en eau pour cette situation présente un écart avec la demande observée (cf. section V.1.2.3). La comparaison de la demande en eau calculée pour un scénario et de la demande observée pour la situation de référence semblait alors incongrue. Le recours au même modèle calculatoire pour estimer la demande en eau de la situation de référence et des scénarios produits nous permet de comparer les scénarios sur une même base calculatoire. J'ai utilisé cette situation de référence comme base de comparaison dans les applications 1 et 3. Dans l'application 2, j'ai comparé trois scénarios sans considérer ni la situation de référence ni un scénario de référence. Dans ce jeu de scénarios je considère tout de même un des scénarios comme une référence (REF), mais c'est une référence reconstruite à partir de la situation de référence définie au préalable qui n'est ni la situation de référence, ni une projection dans le futur des tendances passée. De plus, je compare les scénarios deux à deux : je commence par comparer le scénario PRECO au scénario REF, puis je compare le scénario SEMIS au scénario PRECO. Dans ce jeu de scénarios, je compare donc bien un scénario à un autre scénario (quelconque).

Dans la Figure 33, je repositionne ces applications par rapport aux éléments décrits et aux bases de comparaison. Nous pouvons constater que certaines cases sont vides. Nous n'avons comparé de scénario à un scénario de référence dans aucune des applications. La comparaison d'un jeu de scénario à un scénario de référence réside dans l'identification de ce scénario de référence (cf. section I.2.4). Ce scénario de référence est en général la projection à un horizon donné des tendances observées dans le passé. Mais il peut tout aussi bien être un scénario jugé comme probable. Dans l'application 3, je propose un scénario jugé probable. Ainsi j'aurais pu caractériser le scénario produit dans l'application 3 comme un scénario de référence auquel j'aurais comparé les autres scénarios. J'aurais aussi pu mobiliser la référence définie en application 2. Je n'ai pas non plus développé d'application où un jeu de scénarios est comparé dans une approche exploratoire. Dans l'application 3, j'aurais pu développer plus de scénarios afin de les comparer. Ce genre d'exercice semble plus pertinent avec des porteurs d'enjeux.

Figure 33 : inscription des applications proposées dans des approches scénario



V.3. Perspectives d'utilisation de l'outil

L'importance de pouvoir raconter les scénarios produits de manière narrative afin de permettre à leurs utilisateurs une meilleure compréhension est soulignée par Rotmans et al. (2000) ou Alcamo (2008) (cf. section I.1.3.3). Dans la section IV.3, la présentation des applications est exclusivement narrative. Cette présentation comporte des valeurs quantifiées, mais ces valeurs sont intégrées à du texte ou des cartes qui facilitent leur lecture. Pour chaque application, j'ai présenté de façon narrative, les objectifs et hypothèses, les scénarios produits et leurs résultats. Ces descriptions narratives ont servi de support pour présenter les scénarios à différents gestionnaires de l'eau du système Neste : l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et la CACG. Nous avons vu en introduction que les scénarios d'usages du sol sont des outils qui facilitent la planification de la gestion spatiale de l'eau. Ils peuvent pour cela être présentés déjà construits et évalués aux porteurs d'enjeux du territoire (cf. Palang et al., 2000). C'est la

démarche que nous avons suivie. Cette démarche a suscité un intérêt de la part de ces porteurs d'enjeux.

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne est intéressée par notre outil et notre démarche pour construire et évaluer des scénarios dans le cadre d'une prospective à l'horizon 2050 qu'elle veut initier pour évaluer l'impact des changements globaux sur l'ensemble des usages de l'eau (environnemental, domestique, industriel, agricole). Elle pourrait confier l'investigation des aspects agricoles à l'Institut National de la Recherche en Agronomie. L'utilisation de SPACSS serait alors exploratoire. Avant de décrire des distributions alternatives de systèmes de culture à l'horizon 2050, il faudra décrire de manière narrative les forces de changement et les évolutions possibles de la distribution des systèmes de culture qui permettront de justifier ces distributions alternatives. Cette étape sera l'occasion de s'entourer d'un ensemble de partenaires diversifiés dont les points de vue sur la distribution des systèmes de culture divergeraient pour un même jeu de forces de changement identifié. Il semble que si l'Agence de l'Eau veut développer des scénarios concernant différents usages de l'eau, c'est à elle qu'incombera la définition d'une méthode pour définir un jeu de forces de changement et de leurs évolutions. Ce jeu devra en effet être identique pour les scénarios concernant les différents usages. Ensuite, il nous appartiendra de définir des interactions entre partenaires et développeurs pour (1) éventuellement redéfinir la situation de référence et puis (2) construire et évaluer des scénarios associés au jeu de forces de changement et de leurs évolution proposé par l'Agence de l'Eau.

BIBLIOGRAPHIE

AGENCE EUROPÉENNE DE L'ENVIRONNEMENT. Scénarios environnementaux. Copenhague : European Environmental Agency. 2009. Disponible sur : <http://www.eea.europa.eu/fr/themes/scenarios>. [consulté le 15 novembre 2009].

AGRESTE, 2002. Recensement général agricole 2000. Cartes thématiques Midi-Pyrénées. CR-Rom édité par le Service Régional de la Statistique Agricole de Midi-Pyrénées.

AGRESTE, 2007. L'irrigation du maïs mise à mal par les sécheresses. Agreste Primeur 194, 1-4.

AGRESTE. Calendrier de parution et repères méthodologiques. Disponible sur : http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/calend_paru_gcult.pdf. [consulté le 15 novembre 2008]

ALCAMO, J. Scenarios as tools for environmental assesments. Prospects and Scenarios N°5, Copenhagen, European Environment Agency. Environmental issue report N°24. 2001. 31p.

ALCAMO, J. Environmental futures. The practices of environmental scenario analysis. Amsterdam: Elsevier, 2008.- 197p.

AMLER, B., BETKE, D., EGER, H et al. 1999. Land Use Planning Methods, Strategies and Tools. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1999. 212p. Diponible sur : http://www.iapad.org/publications/ppgis/gtz_plup.pdf.

ANGEVIN, F., KLEIN, E. K., CHOIMET, C. ET AL.. Modelling impacts of cropping systems and climate on maize cross-pollination in agricultural landscapes: The MAPOD model. European Journal of Agronomy, 2008, 28, 471-484.

ANTONA, M., D'AQUINO, P., AUBERT, S., ComMod: a companion modelling approach. 2004 ; Disponible sur : <http://cormas.cirad.fr/ComMod/en/charter/content.htm>.

BAUDRY, J. "Approche spatiale des systèmes techniques agricoles et environnement", Vol. Nouvelles fonctions de l'agriculture et de l'espace rural, actes du colloque de Toulouse, 1996, 123-137.

BECU, N. Identification et modélisation des représentations des acteurs locaux pour la gestion des bassins versants. Th : Sciences de l'Eau : Montpellier II : 2006 ; 344p.

BECU, N., NEEF, A., SCHREINEMACHERS, P. et al. Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement. Land Use Policy, 2008, 25 (4), 498-509.

BEGUINET, B., REGNACQ, P. & VOELTZEL, G. Atlas de l'Eau du gers. Pau : Observatoire de l'eau. Disponibles sur: <http://www.gers.pref.gouv.fr/GERS/index.htm>. [consulté le 15 novembre 2008]

BERGEZ, J.E., DEBAEKE, P., DEUMIER, J. M., et al., MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, 2001, 137, 43-60.

BIARNES, A., RIO, P., HOCHEUX, A. Analyzing the determinants of spatial distribution of weed control practices in a Languedoc vineyard catchment. *Agronomie*, 2004, 24 (4), 187-196.

BISHOP, P., HINES, A., COLLINS, T. The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight*, 2007, 9, 5-25.

BORJESON, L., HOJER, M., DREBORG, K. H., et al. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 2006, 38, 723-739.

BOUMAN, B. A. M., VAN LAAR, H. H. WANG, Z. Agro-ecology of rice-based cropping systems. Manila. 1993.- 201 pp.

BRISSON, N., MARY, B., RIPOCHE, D., et al.. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 1998 18, 311-346.

BRISSON, N., RUGET, F., GATE, P. et al. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 2002, 22, 69-92.

BURGI, M., HERSPERGER, A., SCHNEEBERGER, N. Driving forces of landscape change - current and new directions. *Landscape Ecology*, 2004 19, 857-868.

BUSCH, G. Future European agricultural landscapes--What can we learn from existing quantitative land use scenario studies? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114, 121-140.

CA32. Diagnostic agricole dans le cadre du SCOT des coteaux du Saves. Chambre d'Agriculture du Gers. 2008, 40p. Disponible sur : <http://www.ccs1-du-gers.com/Syndicat-mixte-coteaux-saves/pdf-telechargement/Diagnostic-Agricole/Diagnostic-Agricole.pdf>. [consulté le 15 novembre 2008]

CASTELLA, J.C., KAM, S. P., QUANG, D. D. et al. Combining top-down and, bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 2007, 24, 531-545.

CETIOM . <http://www.cetiom.fr/>. 2009.

CHECKLAND, P., System Theory and management thinking. *American Behavioural Scientist*, 1994, 38, 75-91.

CINDERBY, S. Geographic information systems (GIS) for participation: the future of environmental GIS? *International Journal of Environment and Pollution*, 1999, 11, 304-315.

CLAESSENS, L., SCHOORL, J.M., VERBURG, P.H. et al. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129, 157-170.

CLAVEL, L., DUCROT, R., and SENDACKZ, S. Gaming with eutrophication: Contribution to integrating water quantity and quality management at catchment level, IWRA, 13ème congrès mondial de l'eau, Montpellier, 1-4 septembre 2008, Montpellier, 2008, pp. 1-13.

CLAVEL, L., SOUDAIS, J., BAUDET, D. et al. Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy*, 2009, Submitted.

COHEN, S.J. Scientist-stakeholder collaboration in integrated assessment of climate change: lessons from a case study of Northwest Canada. *Environmental Modelling & Software*, 1997, 2, 281-293.

COYETTE, E. Note de problématique étude-recherche sur la gestion territoriale des ressources. Bruxelles : COTA, 2004, 18 p. Disponible sur : http://www.cota.be/SPIP/IMG/pdf/Note_GTR.pdf.

CRAMP . Les grands ensembles morpho-pédologiques de Midi-Pyrénées. Chambre d'Agriculture de Midi-Pyrénées. 1993. Disponible sur : <http://www.midipyrenees.chambagri.fr/-Guide-des-sols-de-Midi-Pyrenees-.html>.

DE KONING, G.H.J., VERBURG, P. H., VELDKAMP, A., et al.. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, 1999, 61, 77-93.

DE SILVA, C.S., WEATHERHEAD, E.K., KNOX, J.W. et al. Predicting the impacts of climate change - A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 2007, 93, 19-29.

DEBAEKE, P., MAILLHOL, J.-C. & BERGEZ, J.-E. Adaptations agronomiques au risque de sécheresse. *In* : Sécheresse et agriculture : Rapport d'expertise. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2006. p. 259-306.

DEUMIER, J.-M., LACROIX, B., BOUTHIER, A., et al. Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive. Arvalis Institut du Végétal, 2006. 10p. Disponible sur : http://www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr/fichiers/ressource_limitee/Article%20irrigation%20ma%20sorgho%20avec%20photos.pdf.

DIAMOND, J. *Collapse*. New York : Viking Press, 2005,- 592 p.

Dictionnaire Hachette / ed. par Vincent BRUGERE FRELAT. Paris : Hachette, 1980.- 1408p.

Dictionnaires Larousse en ligne. / ed. par Isabelle JEUGE-MAYNART, Vélizy ; Larousse. 2009. Disponible sur : <http://www.larousse.fr/dictionnaires>. [consulté le 15 septembre 2009].

DOCKERTY, T., LOVETT, A., APPLETON, K., et al. Developing scenarios and visualisations to illustrate potential policy and climatic influences on future agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114, 103-120.

DONATELLI, M., ACUTIS, M., BELLOCHI, G., et al. New indices to quantify patterns of residuals produced by model estimates. *Agron J*, 2004, 96, 631-645.

DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome : Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 1979,- 193 p. Disponible sur : <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/parta.stm>.

ETIENNE, M., LE PAGE, C., COHEN, M. A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2003. 6, 2.

FAIVRE, R., LEENHARDT, D., VOLTZ, M., Spatialising crop models. *Agronomie*, 2004, 24, 205-217.

FAO 1993. Guidelines for land-use planning. Rome : Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 1993, Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/T0715E/t0715e00.htm>.

FEUILLETTE, S. L'eau en France : entre subsidiarité et gestion spatiale. *Cybergeog : European Journal of Geography* [En ligne] Dossiers, Séminaire de recherche du GDR Rés-Eau-Ville (CNRS 2524) "L'eau à la rencontre des territoires", Montpellier, France, 27-28 et 29 mai 2004, disponible sur : www.cybergeog.eu/index1312.html.

FOLEY, J.A., DE FRIES, R., ASNER, G. P., et al. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005, 309, 570-574.

FRANCE AGRICOLE, 2003. Se lancer dans le tabac en limitant les frais. n°3002, pp 33.

GARCIA, F., GUERRIN, F., MARTIN-CLOUAIRE, R., et al. The human side of agricultural production management - the missing focus in simulation approaches. In: Zenger, A., Argent, R.M., (Eds.). *Proceedings of the MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation*. Melbourne, Australia, 12-15 December 2005, pp. 203-209.

GIEC . Résumé à l'attention des décideurs - Scénarios d'émission. Obasi, G. O. P. and Töpfer, K. Special Report of IPCC Working Group III, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2000. 26p.

GIRARDIN, P. 1998. Ecophysiologie du maïs. Institut technique des céréales,- 323p.

GODET, M. De l'anticipation à l'action. Manuel de prospective et de stratégie. Paris : Dunod Ed. 1991.- 390p.

- GODET, M., ROUBELAT, F., Creating the future: The use and misuse of scenarios. Long Range Planning, 1996, 29, 164-171.
- GOLAN, A., JUDGE, G., MILLER, D. Maximum Entropy Econometrics: Robust estimation with limited data. New York : Wiley, 1996,- 324 pp.
- GREEUW, S, VAN ASSELT, M. B. A., GROSSKURTH, J., et al. Cloudy crystal balls - An assessment of recent European and global scenario studies and models. European Environment Agency. Environmental. Series N° 17. 2000. 112 p.
- HOLL, A., ANDERSEN, E. Landscape impact of three agricultural policy scenarios. Danish Journal of Geography, 2002, 3, 59-75.
- HOPNER, C. Trust--A monolithic panacea in land use planning? Land Use Policy, 2009, 26, 1046-1054.
- HOUET, T. Occupation des sols et gestion de l'eau : modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE du Blavet). Th : Géographie: Rennes II : 2006 ; 368p.
- HOWITT, R., REYNAUD, A. Spatial disaggregation of agricultural production data using maximum entropy. European Review of Agricultural Economics, 2003, 30, 359-387.
- HULME, M., DESSAI, S. Predicting, deciding, learning: can one evaluate the 'success' of national climate scenarios? Environmental Research Letters, 2008, 3, 1-7.
- HURAND, P. La gestion opérationnelle d'un système complexe: "Le système Neste". Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, 2000. 23p.
- JAKEMAN, A.J., LETCHER, R. A. Integrated assessment and modelling: features, principles and examples for catchment management. Environmental Modelling & Software, 2003, 18 (6), 491-501.
- JANSSEN, S., EWERT, F., Li, H., ATHANASIADIS, I. N., et al. Defining assessment projects and scenarios for policy support: Use of ontology in Integrated Assessment and Modelling. Environmental Modelling & Software, 2009, 24, 1491-1500.
- JESSEL, B., JACOBS, J. Land use scenario development and stakeholder involvement as tools for watershed management within the Havel River Basin. Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters, 2005, 35 (3), 220-233.
- JOUE, P. La dimension spatiale des systèmes de culture : comparaison entre agriculture tempérée et agriculture tropicale. Cahiers Agricultures, 2007, 15, 255-260.
- KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences ? 1986? 31, 13-24.
- KOEHLER, B., KOONTZ, T.M. Citizen participation in collaborative watershed partnerships. Environmental Management, 2008, 41, 143-154.

LAMBIN, E.F., ROUNSEVELL, M. D. A., GEIST, H. J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 82 (1-3), 321-331.

Larousse Agricole : Le monde paysan au XXI^e siècle / ed. par Marcel MAZOYER ; Turin : Larousse, 2002.- 767p.

LAUTENBACH, S., BERLEKAMP, J., GRAF, N. et al. Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: Application of the Elbe DSS. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24 (1), 26-43.

LAVIGNE, C., KLEIN, E. K., MARI, J.-F., et al. How do genetically modified (GM) crops contribute to background levels of GM pollen in an agricultural landscape? *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45, 1104-1113.

LA BARS, M., LE GRUSSE, P. Use of a decision support system and a simulation game to help collective decision-making in water management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 62, 182-189.

LE BER, F., BENOIT, M., SCHOTT, C. et al. Studying crop sequences with CarrotAge, a HMM-based data mining software. *Ecological Modelling*, 2006, 191 (1), 170-185.

LE GRUSSE, P., LE BARS, M. & MAILLHOL, J.-C. Modélisation participative et jeu de simulation pour une gestion collective des ressources à l'échelle du territoire. ANR ADD APPEAU. WP3DIa, 2008. 62p.

Le Petit Robert / ed. par Josette REY-DEBOVE et Alain REY. Paris : Dictionnaires Le Robert, 2003.- 2949p.

LEDoux, E., GOMEZ, E., MONGET, J. M. et al. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment*, 2007, 375, 33-47.

LEENHARDT, D., ANGEVIN, F., BIARNES, A. et al. Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009. PREPRINT.

LEENHARDT, D., TROUVAT, J.-L., GONZALES, G. et al. Estimating irrigation demand for water management on a regional scale: I. ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information. *Agricultural Water Management*, 2004 a, 68, 207-232.

LEENHARDT, D., TROUVAT, J.-L., GONZALES, G. et al. Estimating irrigation demand for water management on a regional scale: II. Validation of ADEAUMIS. *Agricultural Water Management*, 2004 b, 68, 233-250.

LE MOIGNE, J.-L., La modélisation des systèmes complexes. Dunod, Paris, 1999.

LEVY, D., BERTIN, M., COMBES, B. et al. Irrigation durable. Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation de la Pêche et de la Ruralité. N° CGGREF : 2185, 1-117. 2005.- 117p.

LOYCE, C. & WERY, J. 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In : DORE, T., LE BAILL., M., MARTIN, P. et al. L'agronomie d'aujourd'hui. Versailles : Quae, 2006,-p 77-98.

MAHMOUD, M., LIU, Y., HARTMANN, H. et al. A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24, 798-808.

MAKOWSKI, D., HILLIER, D., WALLACH, D. et al. 2006. Parameter estimation for crop models. In: WALLACH, D., MAKOWSKI, D. & JONES, J. W. Working with dynamic crop models. Amsterdam : Elsevier, 2006,- p 101-149.

MANDEMENT, A. Compte-rendu et bilan du débat public de Charlas. Paris : Commission Nationale de Débat Public, 2004, 64p.

MARIEN, M. Futures studies in the 21st Century: a reality-based view. *Futures*, 2002, 34, 261-281.

MARTIN, P., JOANNON, A., MIGNOLET, C. et al. Systèmes de culture et territoires: cas des questions environnementales. In : DORE, T., LE BAILL., M., MARTIN, P. et al. L'agronomie d'aujourd'hui. Versailles : Quae, 2006,- p253-283.

MATON, L. Représentation et simulation des pratiques culturales des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation. Application à un bassin versant maïsicole du sud-ouest de la France. Th : Agronomie. Institut National Polytechnique de Toulouse : 2006 ; 232p.

MATON, L., BERGEZ, J. E., LEENHARDT, D. Modelling the days which are agronomically suitable for sowing maize. *European Journal of Agronomy*, 2007, 27 (1), 123-129.

MATON, L., LEENHARDT, D., BERGEZ, J. E. Geo-referenced indicators of maize sowing and cultivar choice for better water management. *Agronomy for Sustainable Development*, 2007, 27, 377-386.

MAVROMATIS, T., BOOTE, K. J., JONES, J. W. et al. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Science*, 2001, 41, 40-51.

MC COWN, R.L., HAMMER, G. L., HARGREAVES, J. N. G. et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50, 255-271.

MERMET, L. Participation, strategies and ethics: roles of people in wetland management. *Landscape and Urban Planning*, 1991, 20, 231-237.

MERMET, L., TREYER, S. Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ? *Annales des mines. Responsabilité et environnement. (FRA)*, 2001, 22, 67-79.

MEYNARD, J. M., DORE T., HABIB R. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. Compte rendu de l'Académie d'agriculture de France, 2001, 87, 223-236.

MIGNOLET, C. Modélisation de l'organisation spatiale des systèmes agricoles et de son évolution dans des démarches d'appui au développement. Th : Agronomie : AgroParistech : 2008 ; 200p.

MIGNOLET, C., SCHOTT, C., BENOIT, M. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie* 2004, 24, 219-236.

MIGNOLET, C., SCHOTT, C., BENOIT, M. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of The Total Environment*, 2007, 375 (1-3), 13-32.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and Human Well-Being: Volume 2 Scenarios: Findings of the Scenarios Working Group. Washington, DC, USA : Island Press, 2003,- 596 pp.

MORA, O., AUBERT, F., FRÉMONT, A. et al. Les nouvelles ruralités en France à l'horizon 2030. Paris : Quae, 2008, 112 pp.

MOURAD, D.S.J., VAN DER PERK, M., GOOCH, G. D. et al., GIS-based quantification of future nutrient loads into Lake Pelsi/Chudskoe using qualitative regional development scenarios. *Water Science and Technology*, 2005, 51, 355-363.

MÜCHER, C. A., HENNEKENS, S. M., BUNCE, R. G. H. & SCHAMINÉE, J. H. J. Mapping European habitats to support the design and implementation of a Pan-European Ecological Network. Wageningen: Alterra. Alterra report 952. The PEENHAB project. 2004, 129p.

MUNIER, B., BIRR-PEDERSEN, K., SCHOU, J. S. Combined ecological and economic modelling in agricultural land use scenarios. *Ecological Modelling*, 2004, 174, 5-18.

NARCY, J. B. Pour une gestion spatiale de l'eau. Comment sortir du tuyau ? Bruxelles : Peter Lang, 2004, 342 pp.

NARCY, J.B., MERMET, L. Nouvelles justifications pour une gestion spatiale de l'eau: New justifications for a spatial management of water. *Nature Sciences Sociétés*, 2003, 11, 135-145.

NUSEIBEH, B., KRAMER, J., FINKELSTEIN, A. A framework for expressing the relationships between multiple views in requirements specification, *IEEE Transaction on software Engineering*, 1994,- 20p.

OWEIS, T., HACHUM, A., 2001. Reducing peak supplemental irrigation demand by extending sowing dates. *Agricultural Water Management* 50, 109-123.

PALANG, H., ALUMAE, H., MANDER, U. Holistic aspects in landscape development: a scenario approach. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50, 85-94.

- PARKER, P., LETCHER, R., JAKEMAN, A. et al. Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17 (3), 209-217.
- POCEWICZ, A., NIELSEN-PINCUS, M., GOLDBERG, C. et al. Predicting land use change: comparison of models based on landowner surveys and historical land cover trends. *Landscape Ecology*, 2008, 23, 195-210.
- POINTEREAU, P. Contribution au débat public sur le projet de réservoir Charlas Données sur l'irrigation du Maïs en Midi-Pyrénées. Solagro. 2003.
- PONTIUS, R.G., CORNELL, J. D., HALL, C. A. S. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85, 191-203.
- POPPER, R. How are foresight methods selected? *Foresight*, 2008, 10, 62-89.
- POSTMA, T.J.B.M., LIEBL, F. How to improve scenario analysis as a strategic management tool? *Technological Forecasting and Social Change*, 2005, 72, 161-173.
- POUX, X. 2006. Agriculture, environnement et territoires - Quatre scénarios à l'horizon 2025. Paris : La Documentation Française, 2006, 222 pp. Disponible sur: <http://developpementdurable.revues.org/index6632.html>.
- REIDSMA, P., TEKELENBURG, T., VAN DEN BERG, M., et al. Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114, 86-102.
- RITCHIE, J., SINGH, U., GODWIN, D. et al. Cereal growth, development and yield. Understanding options for agricultural production. In: TSUJI, G.Y., HOOGENBOOM, G., THORNTON, P.K. Understanding options for agricultural production. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1998, p 79-98.
- ROTMANS, J., VAN ASSELT, M., ANASTASI, C. et al. Visions for a sustainable Europe. *Futures*, 2000, 32, 809-831.
- ROUNSEVELL, M.D.A., ANNETS, J. E., AUDSLEY, E. et al. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 95, 465-479.
- SADOK, W., ANGEVIN, F., BERGEZ, J. E. Et al. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29, 447-461.
- SCEES, 2004. Enquête sur les pratiques culturelles en 2001, Agreste, Chiffres et données agriculture 159, 253 pp.
- SCHOTT, C., MIGNOLET, C. & BENOÎT, M. Organisation spatiale des systèmes de cultures sur le bassin de la Vesle. Rapport d'activité du programme PIREN-SEINE. 2007. 25p.
- SEBILLOTTE, M. 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In COMBES, L. & PICARD, D. Les systèmes de culture. Paris : INRA, 1990, 196p.

SEMENOV, M.A., MARTRE, P., JAMIESON, P. D. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149, 1095-1104.

SIMON, C., BIGOT, G., BOMMEL, P. et al. Litterature review of scenario methods. ANR ADD TRANS, Transformation de l'élevage et dynamiques des espaces. 2006, 80p.

SOLAGRO . Dialecte. 2009. Disponible sur : <http://dialecte.solagro.org/>.

STOLTE, J., RITSEMA, C. J., BOUMA, J. Developing interactive land use scenarios on the Loess Plateau in China, presenting risk analyses and economic impacts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105, 387-399.

THEROND, O., BELHOUCLETTE, H., JANSSEN, S. et al. Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12, 619-630.

TRESS, B., TRESS, G. Scenario visualisation for participatory landscape planning--a study from Denmark. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64, 161-178.

TROUVAT, J. L. Concepts de base de la gestion quantitative de la ressource en eau. Lacroix, F. [AFEID - AGPM], 121-136. 1997. Antony, AFEID. Irrigation, outil de qualité et de régularité de la production agricole pour les marchés et les industries d'aval. La gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant: l'exemple du Sud-Ouest. 15-10-1997.

UMINATE . Alternatives à la Construction de nOuveaux Réservoirs. Fédération Midi-Pyrénées des associations de protection de la nature et de l'environnement. France Nature Environnement. 2007, 5P. Disponible sur : <http://www.uminat.asso.fr/Projet-ACOR.html>.

VAN DER WERF, H.M.G., TZILIVAKIS, J., LEWIS, K. et al. Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118, 327-338.

VAN ITTERSUM, M.K., EWERT, F., HECKELEI, T. et al. Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems*, 2008, 96 (1-3), 150-165.

VAN MEIJL, H., VAN RHEENEN, T., TABEAU, A. et al. The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006 114, 21-38.

VAN NOTTEN, P.W.F., ROTMANS, J., VAN ASSELT, M. B. A. et al. An updated scenario typology. *Futures*, 2003, 35, 423-443.

VELDKAMP, A., FRESCO, L. O. Exploring land use scenarios, an alternative approach based on actual land use. *Agricultural Systems*, 1997, 55, 1-17.

VERBURG, P.H., SCHULP, C. J. E., WITTE, N. et al. Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114, 39-56.

VIAUD, V.r., MONOD, H., LAVIGNE, C. et al. Spatial sensitivity of maize gene-flow to landscape pattern: a simulation approach. *Landscape Ecology*, 2008, 23, 1067-1079.

WALKER, D.H. Decision support, learning and rural resource management. *Agricultural Systems*, 2002, 73 (1), 113-127.

WANG, E., CRESSWELL, H., PAYDAR, Z., et al. Opportunities for manipulating catchment water balance by changing vegetation type on a topographic sequence: a simulation study. *Hydrological processes*, 2008, 22, 736-749.

WECHSUNG, F., KRYSANOVA, V., FLECHSIG, M. et al. May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? *Landscape and Urban Planning*, 2000, 51, 177-189.

WESTHOEK, H.J., VAN DEN BERG, M., BAKKES, J. A. Scenario development to explore the future of Europe's rural areas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114, 7-20.

YOU, L., WOOD, S. An entropy approach to spatial disaggregation of agricultural production. *Agricultural Systems*, 2006, 90, 329-347.

ANNEXES

Annexe 1 Caractérisation des données nécessaires à l'exécution des règles de décision de MO_uSTICS

144 fichiers décrivant les données d'entrées nécessaires à l'exécution des règles de décision (semis, fertilisation, irrigation et récolte) de MO_uSTICS ont été définis à partir de bibliographie et de dire d'experts. Chaque fichier est défini pour chaque groupe de sol (Alluvions, A ; Boulbènes, B ; et Terreforts, T), ce qui permet de modifier la règle de décision relative à une culture seulement dans un groupe de sol particulier. Pour l'instant, seules les règles de décision relatives à l'irrigation ont été déclinées selon le type de sol. Il en résulte :

4 règles de décision à caractériser x 3 groupes de sols x (7 cultures définies en sec + 5 cultures définies en irrigué) = 144 fichiers

Les tableaux suivants présentent les valeurs qui ont été définies dans ces fichiers afin d'exécuter les simulations.

Légende des tableaux

Valeur des indicateurs opérateurs ou valeurs rencontrées dans la littérature ou obtenues à partir d'entretien avec des experts
[Valeurs des indicateurs, opérateurs et valeurs traduits pour les besoins du modèle quand elles ne sont pas directement utilisables par ce modèle]
Non spécifié dans cette thèse (les fichiers ont été définis par défaut : par exemple si l'irrigation n'est pas définie, la valeur de l'apport est définie à 0 mm)

Blé dur									
Règle de décision	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source
Semis	ET	Date	=	Octobre - novembre		Densité	=	De 2 500 000 à 3 000 000 grains/ha	Bibliographique : Larousse (2002) Agreste (2008)
		Sol	=	Pénétrable		Variété	=	Non précisée	
	ET	[Date]	[>]	[01/11]		[Densité/ha]	[=]		
	ET	[Date]	[<]	[01/12]		[variété]	[=]	[3 000 000]	
	ET	[FRUT]	[=]	[0.85]				[tardive]	
Fertilisation		Date	=	01 février		apport	=	50	Expert
		Date	=	15 mars		apport	=	100	
		Date	=	25 avril		apport	=	50	
Irrigation*									
Déclenchement	ET	Stade	=	floraison		Apport	=	25 mm	Expert
		Sol	=	Trop sec					
	ET	[SommeT°C.j]	[>]	[800]		[dose]	[=]	[25]	
	ET	[FRUT]	[<]	[0.7]					
Retour									
Retard									
Arrêt									
Récolte	ET	Date	=	Juillet- août					Bibliographique : enquêtes pratiques culturales 2001
		Sol	=	Pénétrable					
	ET	[Date]	[<]	[31/07]					
		[FRUT]	[<]	[0.85]					

*Quand : irrigué

Blé tendre									
Règle de décision	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source
Semis	ET	Date	=	Octobre - novembre		Densité	=	De 2 500 000 à 3 000 000	Bibliographique : Larousse (2002) Agreste (2008)
		Sol	=	Pénétrable		Variété	=	grains/ha Non précisée	
	ET	[Date]	[>]	[01/11]		[Densité/ha]	[=]		
	ET	[Date]	[<]	[01/12]		[variété]	[=]	[3 000 000] [tardive]	
Fertilisation	ET	[FRUT]	[=]	[0.85]					
		Date	=	01 février		apport	=	50	Expert
		Date	=	15 mars		apport	=	100	
		Date	=	25 avril		apport	=	50	
Irrigation									
Récolte	ET	Date	=	Juillet- août					Expert
		Sol	=	Pénétrable					
	ET	[Date]	[<]	[31/07]					
	ET	[FRUT]	[<]	[0.85]					

Colza									
Règle de décision	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source
Semis	ET	Date	=	Du 25 août au 15 septembre		Densité	=	De 40 à 60	Cetiom (2009) Agreste (2008)
		Sol	=	Pénétrable		Variété	=	pieds/m² Non précisée	
					[Densité/ha]	[=]			
					[variété]	[=]			
	ET	[Date]	[>]	[25/08]					
		[Date]	[<]	[30/09]					
	ET	[FRUT]	[=]	[0.85]					
Fertilisation		Date	=	20 janvier		apport	=	80	Expert
		Date	=	20 février		apport	=	100	Expert
Irrigation									
Récolte	ET	Date	=	Juin-juillet					Agreste (2008)
		Sol	=	Pénétrable					
		[Date]	[<]	[31/07]					
	ET	[FRUT]	[<]	[0.85]					

Maïs

Règle de décision	Sol	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source			
Semis		ET	Date	=	Mi avril-fin mai		Densité	=	80 000 plants/ha	Maton (2006) Agreste (2008) Expert			
			Sol	=	Pénétrable		Variété	=	variable				
		ET	[Date]	[>]	[20/04]		[Densité/ha]	[=]	[80 000]				
			[Date]	[<]	[30/05]		[variété]	[=]	[tardive]				
		ET	[PRUT]	[=]	[0.85]								
Fertilisation			[stade]	[=]	[1]		apport	=	200	Expert			
Irrigation*													
Déclenchement		ET	Stade	=	10 feuilles		Apport	=	25 mm	Expert			
			Sol	=	Trop sec								
			[SommeT °C.j] [PRUT]	[>] [<]	[630] ° [0.7]								
Retour	A		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	7 jours	Expert			
							Apport	=	30 mm				
	B		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	7 jours	Expert			
							Apport	=	30 mm				
	T		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	12 jours	Expert			
							Apport	=	40 mm				
Retard			Précipitations (> 2 mm) cumulée sur les 5 derniers jours	>	10 mm		Retard	=	1 jour / 5 mm	Expert			
							Attente maximale autorisée	=	7 jours				
Arrêt		ET	Stade	=	Pâteux mou	SINON	Apport	=	20 mm	Deumier et al. (2006)			
			Sol	=	Trop sec								
		ET	[SommeT °C.j] [PRUT]	[>] [<]	[2000] ° [0.7]		Apport	=	0 mm				
Récolte		ET	Stade	=	Humidité 20 à 40 %					Experts			
			Date	=	Mi septembre – mi octobre								
		ET	Sol	=	Pénétrable								
			[SommeT]	[>]	[2120] °								
		ET	[Date]	[<]	[15/10]								
			[PRUT]	[<]	[0.85]								

*Quand : irrigué

°Pour la variété Cécilia, tardive (pour les autres variétés se reporter à l'annexe 6)

Soja

Règle de décision	Sol	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source			
Semis		ET	Date	=	Avril		Densité	=	60 000 plants/ha	Larousse (2002) Agreste (2008) Cetiom (2009)			
			Sol	=	Pénétrable		Variété	=	variable				
			[Date]	[>]	[01/04]		[Densité/ha]	[=]	[60 000]				
			[Date]	[<]	[30/04]		[variété]	[=]	[précoce]				
		ET	[PRUT]	[=]	[0.85]								
Fertilisation													
Irrigation*													
Déclenchement		ET	Stade	=	R1		Apport	=	25 mm	Cetiom (2009)			
			Sol	=	Trop sec								
			[SommeT °C.j]	[>]	[650] °								
		BT	[PRUT]	[<]	[0.7]								
Retour	A		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau Apport	=	10 jours	Expert			
									35 mm				
	B		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau Apport	=	7 jours	Expert			
									35 mm				
	T		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau Apport	=	12 jours	Expert			
									40 mm				
Retard			Précipitations (> 2 mm) cumulée sur les 5 derniers jours	>	10 mm		Retard	=	1 jour / 5 mm	Expert			
							Attente maximale autorisée	=	7 jours				
Arrêt		ET	Stade	=	R7	SINON	Apport	=	20 mm	Cetiom (2009)			
			Sol	=	Trop sec								
			[SommeT °C.j]	[>]	[1400] °		Apport	=	0 mm				
			[PRUT]	[<]	[0.7]								
Récolte		ET	Stade	=	Humidité 15%					Cetiom (2009)			
			Date	=	Mi septembre – mi octobre								
		ET	Sol	=	Pénétrable								
			[SommeT]	[>]	[1910] °								
		BT	[Date]	[<]	[15/10]								
		BT	[PRUT]	[<]	[0.85]								

*Quand : irrigué

°Pour la variété 00, précoce (pour les autres variétés se reporter à l'annexe 6)

Sorgho

Règle de décision	Sol	SI	Indicateur	= < >	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source
Semis		ET	Date	=	Mai - Juin		Densité	=	16 à 35 plants/m²	Bibliographique : Agreste (2008) Larousse (2002)
			Sol	=	Pénétrable		Variété	=	variable	
			[Date]	[>]	[01/05]		[Densité/ha]	[=]	[270 000]	
			[Date]	[<]	[15/06]		[variété]	[=]	[tardive]	
Fertilisation		ET	[PRUT]	[=]	[0.85]					
Irrigation*			[stade]	[=]	[1]		apport	=	75	Parayre (2005)
Déclenchement		ET	Stade	=	10 feuilles		Apport	=	25 mm	Expert
			Sol	=	Trop sec					
			[SommeT °C.j]	[>]	[840] °					
			[PRUT]	[<]	[0.7]					
Retour	A		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	9 jours	Expert
							Apport	=	30 mm	
	B		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	9 jours	Expert
							Apport	=	30 mm	
	T		Irrigation	=	Déclenchée		Durée du tour d'eau	=	12 jours	Expert
							Apport	=	40 mm	
Retard			Precipitations (> 2 mm) cumulée sur les 5 derniers jours	>	10 mm		Retard	=	1 jour / 5 mm	Expert
							Attente maximale autorisée	=	7 jours	
Arrêt		ET	Stade	=	20 25 jours après épiaison	SINON	Apport	=	20 mm	Deumier et al. (2006)
			Sol	=	Trop sec		Apport	=	0 mm	
			[SommeT °C.j]	[>]	[1100] °					
			[PRUT]	[<]	[0.7]					
Récolte		ET	Date	=	130 à 150 jours après le semis					Experts
			Sol	=	Pénétrable					
			[SommeT]	[>]	[1840] °					
			[Date]	[<]	[15/10]					
		ET	[PRUT]	[<]	[0.85]					

*Quand : irrigué

°Pour la variété Solarius Fulgus, tardive (pour les autres variétés se reporter à l'annexe 6)

Tournesol

Règle de décision	SI	Indicateur	=	Valeur	ALORS	Variable	=	Valeur	Source
Semis		Date	=	15 mars – 30 avril		Densité	=	De 50 000 à 60 000 plants/ha	Larousse (2002) Agreste (2008) expert
	ET	Sol	=	Pénétrable		Variété	=	variable	
	ET	[Date]	[>]	[15/03]		[Densité/ha]	[=]	[60 000]	
	ET	[Date]	[<]	[30/04]		[variété]	[=]	[mi-tardive]	
Fertilisation	ET	[FRUT]	[=]	[0.85]					
Irrigation*		[stade]	[=]	[1]		Apport	=	60 unités	Cétiom (2009)
Déclenchement		Stade	=	Avant Floraison		Apport	=	35 mm	Experts
	ET	Sol	=	Trop sec					
		[SommeT °C.j]	[>]	[850] °					
		[FRUT]	[<]	[0.7]					
Retour									
Retard									
Arrêt		Stade	=	Un mois plus tard		Apport	=	35 mm	Expert
	E			Trop sec					
	T	Sol	=		SINON	Apport	=	0 mm	
		[SommeT °C.j]	[>]	[1150] °					
		[FRUT]	[<]	[0.7]					
Récolte		Stade	=	Humidité 8-11%					Cétiom (2009)
	ET	Date	=	Septembre					
	ET	Sol	=	Pénétrable					
	ET	[SommeT]	[>]	[1800] °					
	ET	[Date]	[<]	[15/09]					
	ET	[FRUT]	[<]	[0.85]					

*Quand : irrigué

°Pour la variété Mélody, mi tardive (pour les autres variétés se reporter à l'annexe 6)

Annexe 2 Construction de la couche sol du système Neste - Compte rendu envoyé au CESBIO - Thèse Lucie Clavel

Bonjour, voici un document de travail qui explique comment j'ai construit la couche sol dans ma thèse. Je rappelle que l'objectif est de construire et d'évaluer des scénarios portant sur la distribution des systèmes de culture du système Neste. Les contraintes étaient donc de :

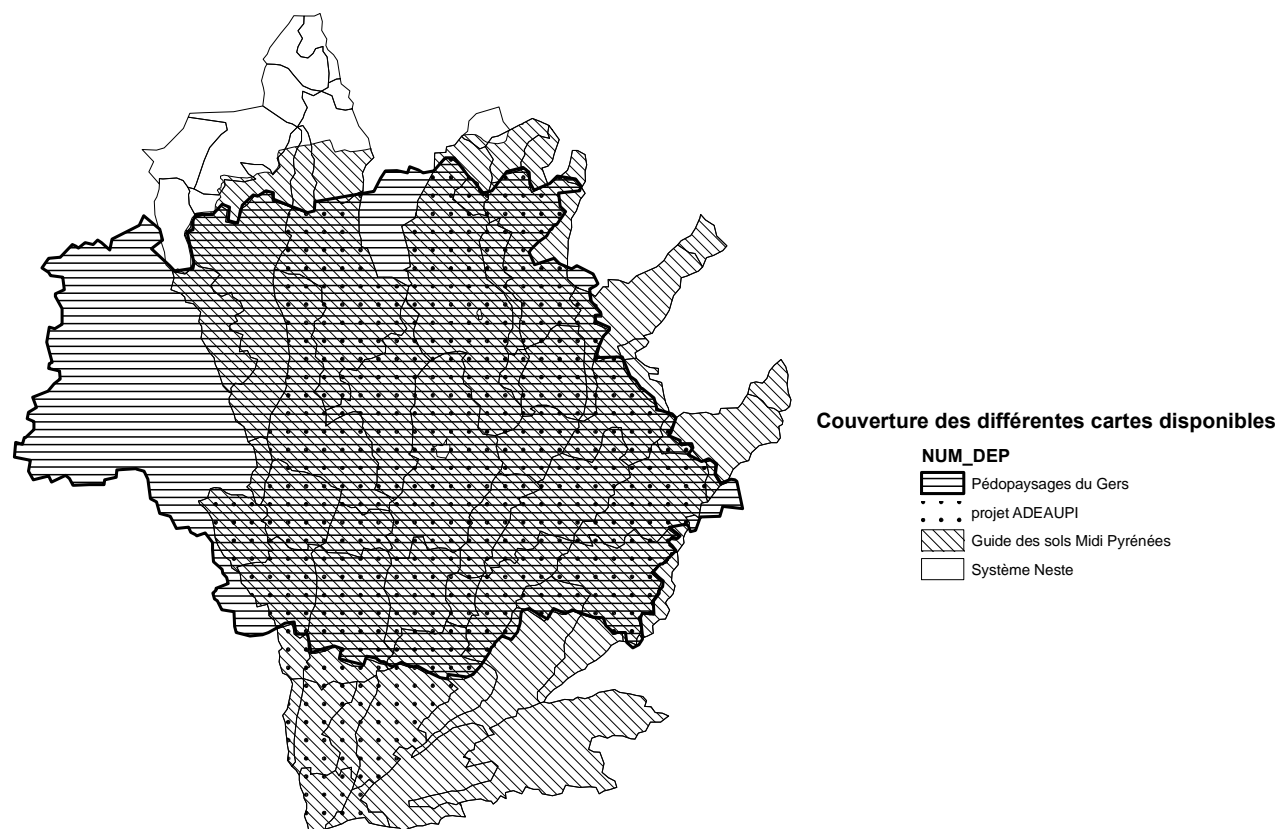
- Produire des fichiers sols permettant de faire tourner un modèle de simulation MOuSTICS (pour l'évaluation des scénarios)
- Conserver une couche sol assez simple pour que les utilisateurs de l'outil se l'approprient pour construire des scénarios (sols types aux contours simples, indicateurs qualitatifs etc)

Dans ce document je présente d'abord les données disponibles, puis la démarche que j'ai suivie pas à pas (ce qui ne facilite pas forcément la lecture. Si vous avez besoin d'un renseignement ou de certaines couches de données (05 61 28 57 12, lucie.clavel@toulouse.inra.fr).

Données disponibles

Nous disposons de trois cartes du sol qui ont été produites par les mêmes personnes (CACG : contact laurent Rigou ; CRAMP : contact Christian Longueval) mais dans différents contextes (associés à différents projets ADEAUI, IGCS et vulgarisation sur le site de la CRAMP) et pour atteindre des objectifs différents. Les contours des cartes ainsi que les données associées sont donc plus ou moins précis. De plus la surface couverte par chacune des cartes est variable.

Figure 34 : La couverture des différentes cartes disponibles



Guide des sols de Midi Pyrénées

Cette carte comporte 43 unités cartographiques pédogéologiques (UC) dont 13 se retrouvent dans le système Neste (cf tableau 1 et carte 2).

avantages

Les contours des UC étant simples et représentatifs de la zone : c'est cette carte qui a été retenue pour décrire les sols. Nous avons donc donné aux sols les sigles des appellations proposées par cette carte (ex. **TPAA** = Terrasses **P**lanes d'**A**lluvions **A**nciennes mal drainées à bouldiers limoneux). Chaque unité cartographique est classée dans des subdivisions, sous-ensembles et grands ensembles pédologiques (éventuellement mobilisable dans des scénarios).

La base de données est disponible sur le site de la Chambre régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/morpho/index.html). Pour chaque UC il y a un accès à une description qualitative élaborée par F. Penalver et C. Longueval.

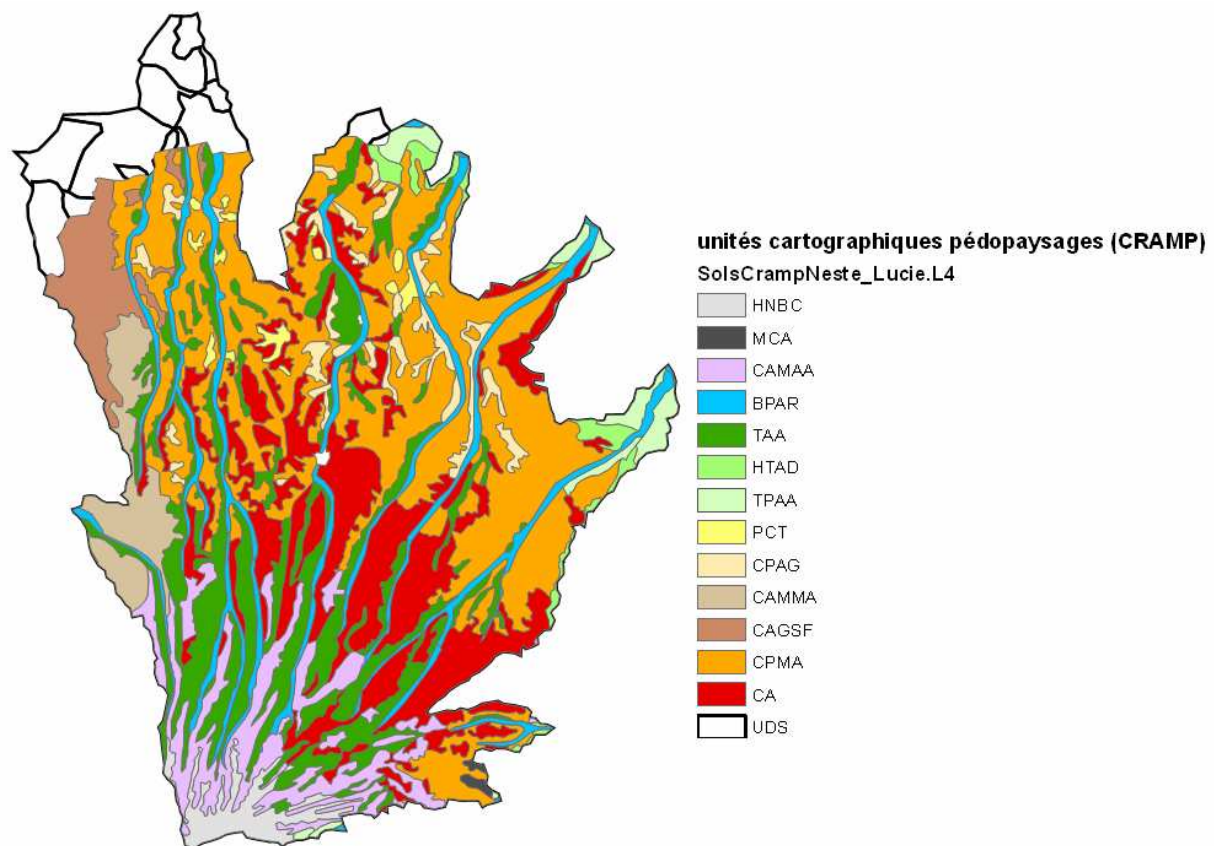
inconvénients

Cette description n'est pas validée statistiquement et ne comporte pas de valeurs quantitatives. De plus cette carte ne couvre pas tout le système Neste.

Tableau 6 : Unités cartographiques pédogéologiques (CRAMP)

tableSols :[GrandEnsemble]	tableSols :[SousEnsemble]	tableSols :[subDivision]	tableSols :[nom Sol]	tableSols :[description]
Grand ensemble	Sous-ensemble	subdivision	sigle	Unité cartographique correspondante
Bassin central de Midi-Pyrénées	Plaines et terrasses alluviales (quaternaire)	Vallées des rivières principales	TPAA	UC3 : Terrasses Planes d'Alluvions Anciennes mal drainées à bouldiers limoneux
		Hautes terrasses anciennes découpées	HTAD	UC6 : Hautes Terrasses Anciennes, Découpées
		Hauts Niveaux Bien Conservés	HNBC	UC7 : Plateaux de Lannemezan et de Ger
		Vallées secondaires	BPAR	UC8 : Basses Plainnes d'Alluvions Récentes argileuses et calcaires UC9 : Basses Plainnes d'Alluvions Récentes non calcaires
			TAA	UC10 : Terrasses d'Alluvions Anciennes (et glaciaires de limons soliflués) – Sud de la Gascogne
	Coteaux molassiques tertiaires	Coteaux argileux sur marnes dominantes	CPMA	UC13 : Coteaux Peu à Moyennement Accidentés
			CA	UC15 : Coteaux Accidentés avec bancs calcaires
		Coteaux sur substrat non calcaire	CAGSF	UC17 : Coteaux Adoucis et Glacis des sables Fauves – Bas Armagnac
			CPAG	UC18 : Coteaux peu accidentés et glacis sur molasse argileuse - Gascogne Centrale
			CAMAA	UC19 : Coteaux accidentés sur molasse argileuse ou argilo-caillouteuse - Sud-Gascogne et piémont pyrénéen
		Coteaux sur substrats hétérogènes	CAMMA	UC23 : Coteaux Accidentés sur Marnes et Molasses Acides – Ouest Gascogne
	Plateaux sur roche calcaire tendre (tertiaire)		PCT	UC24 : Plateaux sur roche Calcaire Tendre (Tertiaire)
Pyrénées	Piémont pyrénéen		MCA	UC42 : Monts calcaires accidentés – Plantaurel, Petites Pyrénées

Figure 35 : Guide des sols de Midi Pyrénées



Carte des sols du projet ADEAUI (CACG)

Cette carte, élaborée dans le cadre du projet ADEAUI comporte 17 unités cartographiques de Sols (UCS), toutes comprises dans le système Nests (cf tableau 2 et carte 3).

Avantages

Les sols ont été décrits de manière quantitative avec des indicateurs qui semblent fédérateurs (cf tableau 2)

- RUPOND : Réserve Utile moyenne des sols présents sur la surface totale de chaque UCS (mm)
- IBPOND : Indice de battance moyen des sols présents sur la surface totale de chaque UCS
- CRPOND : Capacité de rétention moyenne sur la surface totale de chaque UCS (%)
- KSATPOND : Coefficient de saturation moyen des sols présents sur la surface totale de chaque UCS (mm/h)
- PROFPOND : Profondeur moyenne des sols présents sur la surface totale de chaque UCS (mm)

Inconvénients

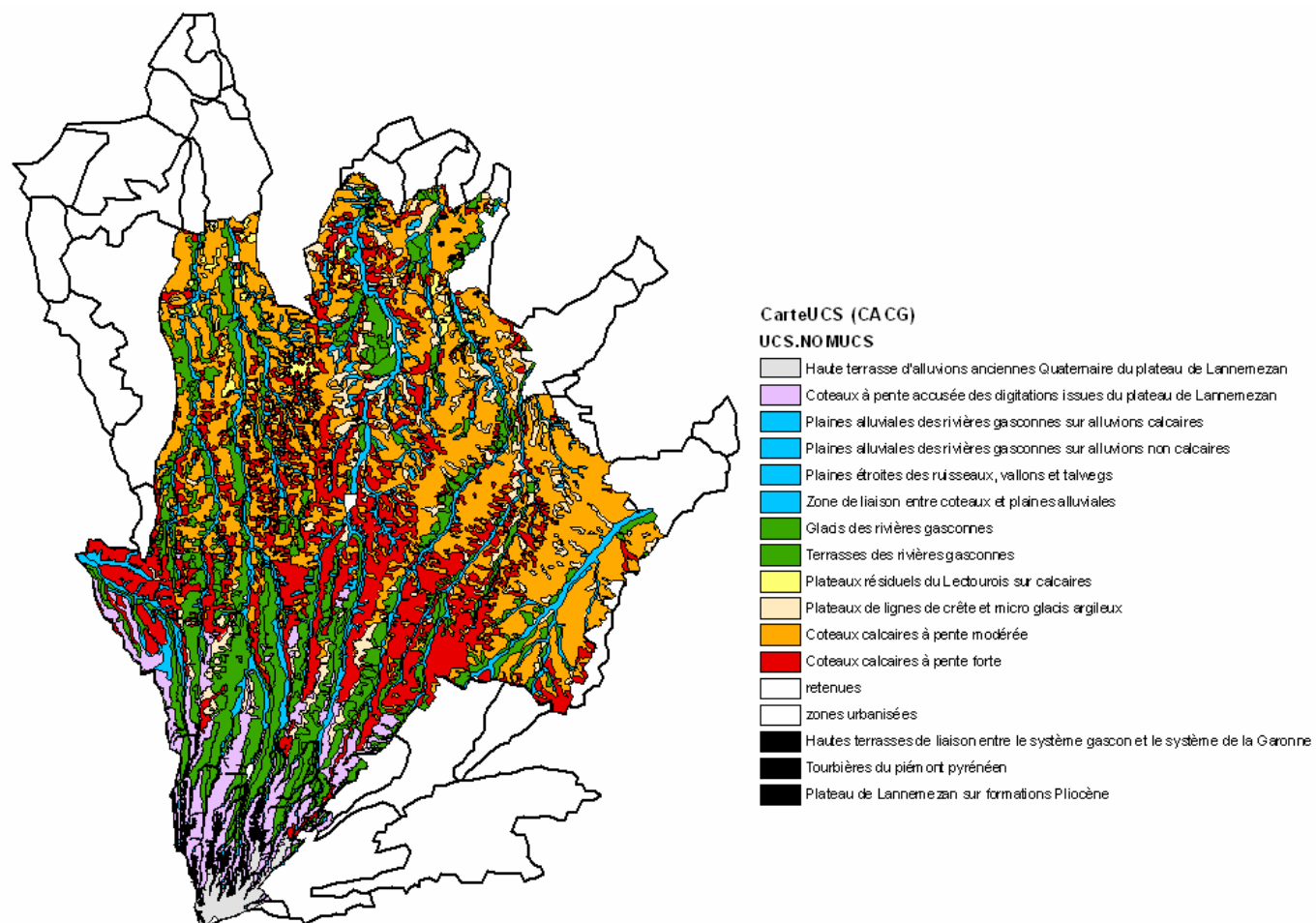
Les contours sont complexes, et le SIG est de mauvaise qualité (recouvrement de polygones).

Les données associées ne permettent pas de reconstituer des fichiers sols nécessaires à l'utilisation de MOUSTICS.

Tableau 7 : Caractéristiques associées aux différentes Unités Cartographiques de Sols dans le projet ADEAUI

IDUCS	RUpond	IBPOND	CRPOND	KSATPOND	PROFPOND	nomUCS
1	303	0,73	30	20	120	Plaines alluviales des rivières gasconnes sur alluvions calcaires
2	303	0,92	33	15	120	Plaines alluviales des rivières gasconnes sur alluvions non calcaires
3	189	0,96	27,2	32	63	Plaines étroites des ruisseaux, vallons et talwegs
4	255	2,08	23,7	12,3	103	Terrasses des rivières gasconnes
6	116	1,47	25	12,5	50	Glacis des rivières gasconnes
8	181	0,88	27	30	60	Zone de liaison entre coteaux et plaines alluviales
9	81	0,97	26,9	25,5	46	Coteaux calcaires à pente modérée
10	122	0,91	27	30	45	Coteaux calcaires à pente forte
12	98	1,15	26,5	5	60	Plateaux de lignes de crête et micro glacis argileux
13	75	0,93	27	30	48	Plateaux résiduels du Lectouais sur calcaires
14	228	1,62	23	14,2	84	Hautes terrasses de liaison entre le système gascon et le système de la
15	177	0,93	27	26,5	60	Coteaux à pente accusée des digitations issues du plateau de Lannemezan
40	0	0	0	0	0	zones urbanisées
43	152	1,11	28	53	104	Haute terrasse d'alluvions anciennes Quaternaire du plateau de Lannemezan
44	113	1,03	28	33,5	80	Tourbières du piémont pyrénéen
45	154	1,18	27,7	33,5	80	Plateau de Lannemezan sur formations Pliocène
48	0	0	0	0	0	retenues

Figure 36 : La carte des sols du projet ADEAUI



Carte des pédopaysages du Gers (IGCS, CRAMP, CACG)

Cette carte comporte 28 unités cartographiques de Sols (UCS) réparties dans le département du GERS.

Avantages

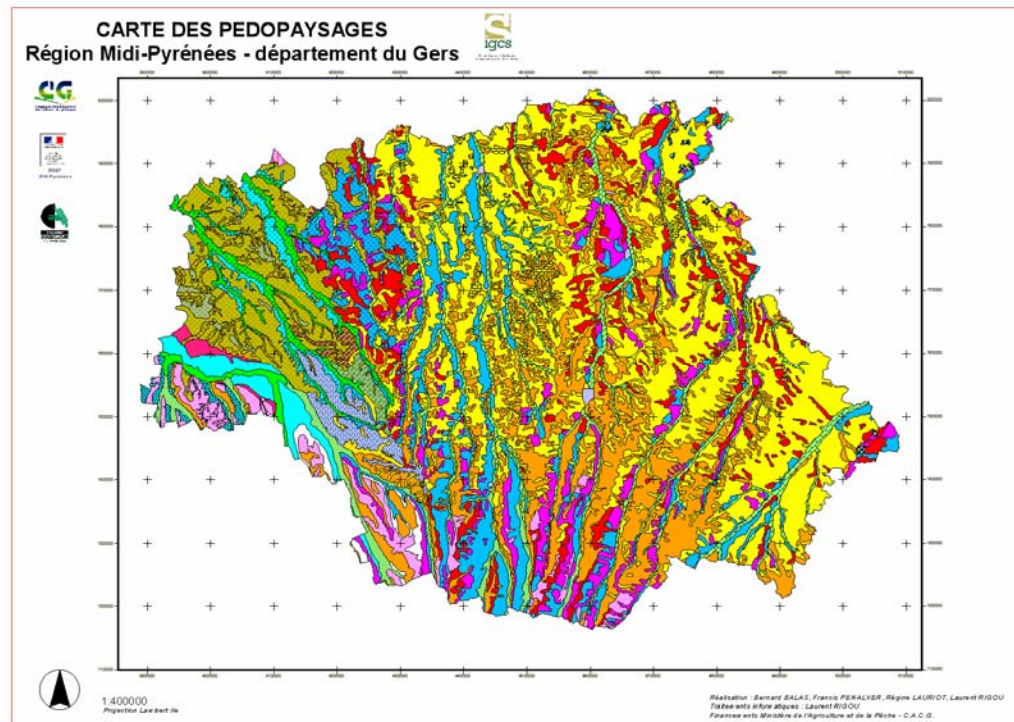
Une base de donnée d'observations de profils de sols a été constituée par des agents de la CACG. Cette base permettra de définir les fichiers.sols à utiliser pour faire tourner MOuSTICS.

inconvénients

Les contours des UCS sont complexes, ne recouvrent pas tout le système Neste, nous ne disposons pas du SIG.

La base de donnée horizon 2000 associée n'est pas homogène selon les unités et incomplète (cf Horizon2000.xls).

Figure 37 : Pédopaysages du Gers



Démarche (1) : Caractérisation des données associées à chaque type de sol

Association des sols entre les bases de données

Cette association a été faite visuellement en vérifiant que les appellations de chaque classes de pédopaysages correspondaient. Sur les cartes CRAMP et CACG nous avons fait en sorte que les légendes correspondent.

Les contours renus sont ceux de la carte guide des sols de Midi-Pyrénées auxquels nous avons associé un sigle.

Tableau 8 : Correspondance entre les différentes unités présentées sur les cartes



Sigle	Guide des sols de Midi Pyrénées	ADEAUI	Pédopaysages du Gers
TPAA	UC3 : Terrasses Planes d'Alluvions Anciennes mal drainées à bouldiers limoneux	Non couvert	Non couvert
HTAD	UC6 : Hautes Terrasses Anciennes, Découpées	Non couvert	Non couvert
HNBC	UC7 : Hauts Niveaux Bien Conservés – Plateau de Ger et de Lannemezan	UC43 : Hautes Terrasses d'alluvions anciennes quaternaires du plateau de Lannemezan	Non couvert
BPAR	UC8 et UC9 : Basses Plaines d'alluvions récentes (argileuse et calcaire / non calcaire)	UC1 : Plaines alluviales des rivières Gasconnes sur alluvions calcaires	UCS1 : Plaines alluviales récentes des rivières dans leur cours aval, sur alluvions calcaires
		UC2 : Plaines alluviales des rivières Gasconnes sur alluvions non calcaires	
		UC3 : Plaines étroites des ruisseaux vallons et talwegs	UCS2 : Plaines alluviales récentes des rivières dans leur cours amont sur alluvions non calcaires
		UC8 : Zone de liaison entre coteaux et plaines alluviales	
TAA	UC10 : Terrasses d'alluvions anciennes	UC4 : Terrasses des rivières gasconnes	UCS5 : Terrasses basses des rivières gasconnes
		UC6 : Glacis des rivières gasconnes	UCS7 : Glacis de liaison entre les terrasses basses et les coteaux des rivières Gélise, Auzoue, Izaute
CPMA	UC13 : Coteaux Peu à Moyennement Accidentés	UC9 : Coteaux calcaires à pente modérée	UCS14 : Coteaux calcaires à pente modérée
CA	UC15 : Coteaux Accidentés avec bancs calcaires	UC10 : Coteaux calcaires à pente forte	UCS15 : Coteaux calcaires à pente forte
CAGSF	UC17 : Coteaux Adoucis et Glacis des sables Fauves – Bas Armagnac	Non couvert	UCS8 : Glacis de liaison entre les terrasses basses et les coteaux des rivières Gélise, Auzoue, Izaute
			UCS12 : Terrasses et glacis des affluents rive droite de l'Adour
			UCS17 : Plateaux de lignes de crête et microglacis argileux
			UCS27 : Buttes de liaison du Nord de la plaine de l'Adour

CPAG	UC18 : Coteaux peu accidentés et glacis sur molasse argileuse - Gascogne Centrale	UC12 : Plateau de ligne de crête et micro glacis argileux	UCS17 : Plateaux de lignes de crête et microglacis argileux
CAMAA	UC19 : Coteaux accidentés sur molasse argileuse ou argilo-caillouteuse - Sud-Gascogne et piémont pyrénéen	UC15 : Coteaux à pente accusée issue des digitations du plateau de Lannemezan	UCS28 : Coteaux à pente accusée des extrémités des digitations des plateaux de Ger et de Lannemezan
CAMMA	UC23 : Coteaux Accidentés sur Marnes et Molasses Acides – Ouest Gascogne	Non couvert	UCS15 : Coteaux calcaire à pente forte
			UCS17 : Coteaux à pente forte de liaison entre le système Gascon et le système Adour
			UCS20 : Plaines très étroites des vallées, des ruisseaux et vallons : talwegs et combes en tête de talweg
			UCS28 : Coteaux à pente accusée des extrémités des digitations des plateaux de Ger et de Lannemezan
PCT	UC24 : Plateaux sur roche Calcaire Tendre (Tertiaire)	UC13 : Plateaux résiduels du Lectourois sur calcaires	UCS18 : Plateaux résiduels du Lectourois sur calcaires
MCA	UC42 : Monts calcaires accidentés – Plantaurel, Petites Pyrénées	Non couvert	Non couvert

Caractérisation des données associées à chaque sols (pour la construction de scénarios)

Les caractéristiques associées à chaque couche de sol seront accessibles aux utilisateurs pour construire des scénarios.

Tableau 9 : Caractéristiques associées aux différents sols dans SPACSS

tableSols : Table			
	Nom du champ	Type de données	Description
	noSol	Numérique	
	nomSol	Texte	sigle de l'appellation donnée par la CRAMP
	typeSol	Texte	Alluvion, Boulbène ou Terrefort (terme utilisé par Jean Boussaguet CA31)
	description	Texte	unité cartographique décrit sur le site de la CRAMP (http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/morpho/index.html)
	subdivision	Texte	subdivision décrite sur le site de la CRAMP (http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/morpho/index.html)
	sousEnsemble	Texte	sous-ensemble décrit sur le site de la CRAMP (http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/morpho/index.html)
	grandEnsemble	Texte	grand ensemble décrit sur le site de la CRAMP (http://www.midipyrenees.chambagri.fr/ancien_site/morpho/index.html)
	Upedopaysage	Texte	Unité de pédopaysage décrite dans la base de donnée IGCS (référentiel régional Pédologique - Gers)
	grandEnsembleIGCS	Texte	grand ensemble morpho-géologique décrit dans la base de donnée IGCS (référentiel régional Pédologique - Gers)
	pente	Texte	pente observée sur ce type de sol (faible moyenne forte) - (guide des sols de Midi Pyrénées)
	potAgronomique	Texte	potentiel agronomique (faible moyen fort) - arbitraire (ici Mr Boussaguet)
	hydromorphie	Oui/Non	hydromorphie (faible moyen fort) - arbitraire (ici Mr Boussaguet)
	RUPOND	Numérique	Réserve utile pondérée sur la surface - mm (source carte Adeaupi)
	IBPOND	Numérique	Indice de battance pondéré sur la surface (source carte Adeaupi)
	CRPOND	Numérique	Capacité de rétention pondérée sur la surface (source carte Adeaupi)
	KSATPOND	Numérique	Coefficient de saturation pondéré sur la surface (source carte Adeaupi)
	PROFPOND	Numérique	Profondeur pondérée sur la surface (source carte Adeaupi)
	notes	Texte	

Pour RUPOND, IBPOND, CRPOND, KSATPOND et PROFPOND :

Le projet ADEAUI propose une seule valeur par UCS (valeur pondérée sur la surface de l'Unité cartographique de sol). Le découpage du territoire en unité de sol que nous avons sélectionné est plus simple que le découpage adopté par ADEAUI (ex BPAR correspond à 4 UCS d'adeaupi)=> dans ce cas nous avons la valeur de chaque paramètre pondéré par la surface de chaque UCS.

Caractérisation des fichiers.sol à utiliser avec MOuSTICS

Les fichiers.sol permettront de faire tourner le modèle MOuSTICS afin d'évaluer chaque scénario produit.

Figure 38 : Données requises dans MOuSTICS

Ajout ou modification d'un sol

numsol: [] argi: [] Norg: [] profhum: [30] calc: [] pH: [8.00] concseuil: [0.20] albedo: [0.20] q0: [12] ruisolnu: [0.00] obstarac: []

Sol: []

Nom du sol: [T1] Aide

	epc	HCCF	HMINF	DAF	cailloux	typecailloux	infil	epd
Horizon 1	[]	[]	[]	1.40	1.00	6	50.00	10
Horizon 2	[]	[]	[]	1.50	0.00	6	50.00	10
Horizon 3	[]	[]	[]	1.45	0.00	6	50.00	10
Horizon 4	[]	[]	[]	1.50	0.00	6	50.00	10
Horizon 5	[]	[]	[]	0.00	0.00	1	50.00	1

☐ nitrification ☒ cailloux ☐ macroporosité

☐ remontées capillaires ☐ drainage

capiljour: [1.0] humcapil: [1.0] profimper: [10.0] ecartdrain: [1.0] ksol: [1.0] profdrain: [1.0]

sol gonflant: ☐

enregistrer le sol

Annuler

Les facteurs clés du rendement

C'est la minéralisation qui conditionne le rendement chez STICS, elle définit la capacité du sol à mettre de l'azote à disposition des cultures. Les facteurs clés de la minéralisation sont

- La teneur en argile de la couche de surface (argi)

- la teneur en azote dans l'horizon d'humification (Norg)
- la teneur en calcaire de la couche de surface (calc)
- la réserve utile, traduite dans STICS par l'humidité à la capacité aux champs (HCCF) et l'humidité minimale exploitable par la plante (HCCF)
- la présence d'un obstacle à l'enracinement peut pénaliser le rendement sur tout sur des sols très peu profonds.

Description des données

La CRAMP met à disposition du grand public des descriptifs des sols de chaque UCS unités caractéristiques de sols décrivant un pedo-paysage homogène. Ces UCS sont des compositions d'UTS : Unités Typologiques de Sols.

Pour chaque UTS, la CRAMP a décrit des profils de chaque UTS. Les paramètres qui sont décrites dans ces profils sont :

- la granulométrie avec les taux (%) d'argile, de LF, de LG de SF et de SG ;
- le pourcentage de matière organique (MO%) ;
- le pourcentage de calcaire total (Calcaire total %) quant il n'est pas négligeable ;
- le pH
- les cations ech « angeables ? » (meg/100g)
- le taux de saturation (taux sat) en S/T %

Notre objectif est de définir des profils types sur la zone.

Définition des horizons

Etape 1

On a choisi arbitrairement (avec Mathieu Vale) 4 horizons d'épaisseur 30 cm, pour lesquels la moyenne pondérée des valeurs disponibles à la CRAMP pour chaque UCS a été effectuée.

La profondeur d'humification (profhum) a été définie arbitrairement à 30 cm, c'est une valeur qui correspond aux profondeurs d'enfouissement des machines agricoles et à l'épaisseur du premier horizon.

Etape 2 :

Profondeur des horizons calculée en moyenne à partir de la base horizon2000. Sinon proposée qualitativement à partir du guide des sols et des données associées à la carte ADEAUI.

Caractérisation des facteurs clefs

PH : moyenne sur les observation disponibles dans Horizon2002 (validation avec Eric Justes : certains pH calculés n'étaient pas cohérents, donc nous avons sélectionnés parmi les observés une valeur cohérente

Epaisseur des profils : moyenne sur les observation horizon2002 et comparaisopn avec données ADEAUI (il est arrivé que nous tronquions des horizons pour être cohérent avec ADEAUI)

Teneurs en argiles, limons et sable : moyenne des observations horizon 2002

Valeurs par défaut

La concentration minimale du sol en NH_4 : concseuil = $0,2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$;
L'albédo du sol nu à l'état sec : albedo = 0,17 (SD) ;
La limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol : $q_0 = 12 \text{ mm}$;
La fraction de pluie ruissellée (par rapport à la pluie totale) en condition de sol nu : $\text{ruisolnu} = 0$;
La densité apparente de la terre fine des horizons : $\text{DAF} = 1.5$;
La teneur volumique en cailloux des horizons : $\text{cailloux} = 0$;
Le type de cailloux (typecailloux) n'est pas important étant donné que la teneur en cailloux est nulle.
L'infiltrabilité à la base de chaque horizon : $\text{infil} = 50$.

Caractérisation des horizons

On a utilisé le logiciel SPAW hydrology (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAW%20Users%20Manual/HydrologicProcesses.htm>) qui à partir des teneurs en argile sables et limons détermine Le point de flétrissement (Wilting Point, WP, % Vol), la capacité au champs (Field capacity, FC, % Vol) et la densité apparente d'un sol (Bulk density, BD, g/cm^3). A partir de ces variables nous avons estimés pour chacun des profils disponibles dans horizon2002 :

$\text{HminF (\% masse)} = \text{Wilting Point/ Bulk Density}$

$\text{HCCF (\% masse)} = \text{Field capacity/Bulk Density}$

Problèmes rencontrés


La base de donnée horizon 2002 étant trop partielle il était impossible de caractériser les fichiers MOuSTICS de certains sols, dans ce cas nous avons utilisé un fichier défini pour une autre unité appartenant prioritairement à la même subdivision géomorphologique, sinon au même sous-ensemble géomorphologique et finalement au même grand ensemble (cf tableau 1).

Par exemple il était impossible de caractériser les sols TPAA et HTAD, nous avons donc utilisé les fichiers caractérisés pour les sols TAA

CAMAA prennent fichiers CPAG

Synthèse des problèmes rencontrés et solutions proposées

Tableau 10 : Difficultés et solutions associées à la caractérisation des différents sols pour SPACSS

	Sur la carte CACG Comment estimer les paramètres RU IB, CR KSAT et PROF qui peuvent permettre de construire des scénarios ?		Sur la carte IGCS Comment caractériser les fichiers d'entrée de MOuSTICS ?	
Problème rencontré	Sol concerné	Solution proposée	Sol concerné	Solution proposée
La carte ne couvre pas le sol considéré	TPAA	On utilise les valeurs de TAA qui s'apparente a TPAA dans la situation (bas fond)	TPAA	On utilise les valeurs de TAA qui s'apparente a TPAA dans la situation (bas fond)
	HTAD	On utilise les valeurs de TAA qui s'apparente a TPAA dans la situation (bas fond)	HTAD	On utilise les valeurs de TAA qui s'apparente a TPAA dans la situation (bas fond)
	CAGSF	?	HNBC	
	CAMAA	On utilise les valeurs de CPAG		
	MCA	On supprime (<5% de l'unique UDS concernée)		
Le sol considéré correspond à plusieurs UC dans les autres BDD	BPAR	Dans la BDD CACG les valeurs étaient pondérées sur la Surface, on réutilise la même méthode en pondérant les attributs de chaque sols par la surface qu'ils représentent	TAA	On a retenu le seul sol renseigné dans la BDD IGCS (UTS 701, aucune observation pour UTS 702)
	TAA	Dans la BDD CACG les valeurs étaient pondérées sur la Surface, on réutilise la même méthode en pondérant les attributs de chaque sols par la surface qu'ils représentent	BPAR	On a retenu le sol le mieux renseigné dans la BDD IGCS (UTS 101, valeurs manquantes pour UTS 201)
			CAGSF	On a retenu le seul sol renseigné dans la BDD IGCS (UTS 801, aucune observation pour UTS 802 et 803)
			CAMMA	On a retenu le seul sol renseigné dans la BDD IGCS (UTS 1702, données manquantes ou partielles pour les UTS 1501, 1502, 2001, 2002 et 2801 à 2806)

Démarche (2) : Estimation des surfaces de chaque sol dans les zones non renseignées du système Neste

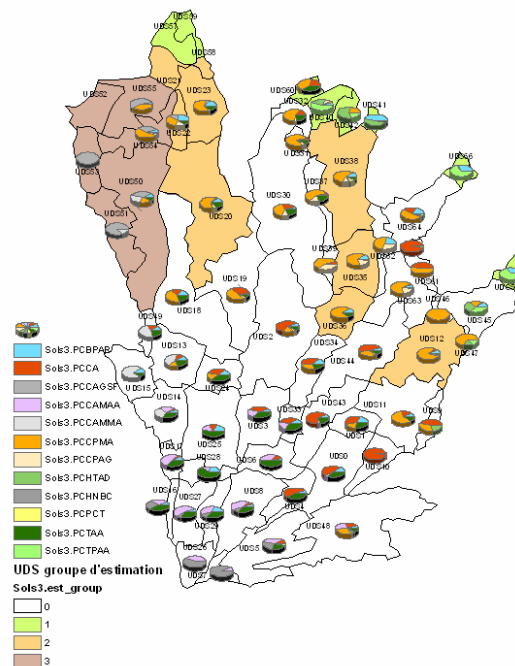
On a créé visuellement trois groupes d'UDS (cf carte 5) selon leur position dans le bassin (nb UDS = découpage élémentaire dans notre étude):

- en vert (groupe 1) : l'UDS est localisée dans le bas fond de la Garonne
- en orange (groupe 2) : UDS de coteaux
- en marron (groupe 3) : UDS dans les sables fauves

Visuellement aussi nous avons déterminé quelles UDS renseignées appartenaient à ces trois groupes (cf carte 5)

Nous avons affecté aux UDS non renseignée la distribution moyenne des sols observées dans les autres UDS du même groupe.

Figure 39 : UDS estimées homogènes pour la distribution des sols



Annexe 3 Compte Rendu Réunion Chambre d'agriculture 31 - 18 février 2008

Déroulement

Lieu CA31 Muret

Présents

Jean Boussaguet - Julie Soudais - Lucie Clavel

Objectifs

valider ou invalider (expertiser) la typologie d'exploitation que nous avons développée

- a. les types
- b. la caractérisation des types

Cet objectif consistait dans un premier temps à confronter les critères identifiés avec Christian Montgobert (CRAMP) définissant les types d'exploitation à la perception de Jean Boussaguet. Ensuite, l'objectif était de vérifier la pertinence des attributs que nous proposons pour décrire chaque exploitation type, notamment quand nous avons fait des regroupements de cultures. Chaque exploitation type est décrite par sa SAU (moyenne) et le pourcentage (moyen) de chaque culture dans cette SAU : (1) blé, maïs, soja, tournesol, colza, sorgho et autres en sec ; (2) maïs, blé, autres céréales, tournesol, soja, pois, autres substituables (surfaces sur lesquelles nous pourrions formuler des scénarios) et autre non substituables (surfaces figées, arbres) en irrigué.

Matériel disponible

- Tableau présentant les exploitations types selon des critères (OTEX, Dimension économique et Surface Irriguée/ Surface Agricole Utile) et des seuils au sein de ces critères
- Descriptif standard d'une exploitation type (libellé attribut, signification attribut, unité utilisée).

localiser les exploitations types (ou les cultures) dans le territoire

L'objectif principal de cette rencontre était d'identifier des règles (d'expert) permettant de distribuer nos exploitations types (ou cultures, selon l'évolution de la discussion) dans le territoire en fonction de critères dont nous connaissons la localisation (sol-climat).

Matériel disponible

- carte : répartition des exploitations types en pourcentage par UDS (camembert) + nb total d'exploitations
- carte : répartition des exploitations types en pourcentage par PRA (camembert) + nb total d'exploitations
- cartes des sols CRAMP
- cartes des sols CACG
- tableau descriptif de chaque sol (CRAMP VS CACG) : usage dominants, pente, indicateurs CACG (RU, KSAT, IB, PROF, CR)
- carte UDS
- carte UGEST + rivières

Détailler les règles d'irrigation

L'idée de cette partie était de créer un jeu de règles de décisions relatives à l'irrigation mobilisable pour chaque cultures dans les scénarios et simulations.

Matériel disponible :

- Une grille présentant une ligne par culture et une colonne par rdd de MODERATO ainsi qu'une colonne « remarques » et une colonne « comportements » si il était possible d'identifier plusieurs comportements.

construire des scénarios

Si le temps le permettait, un des objectifs était de construire un premier scénario.

Discussion

typologie d'exploitation

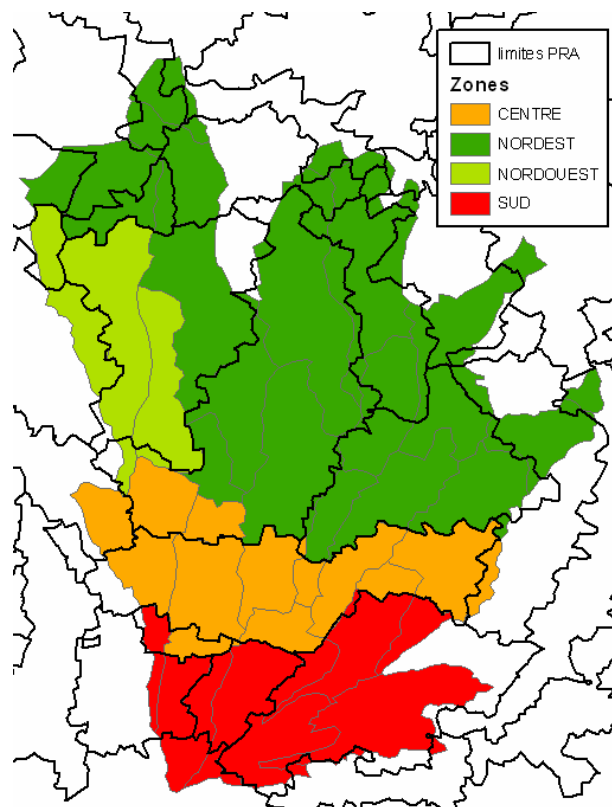
Jean Boussaguet a été surpris que nous ne distinguions pas au sein des exploitations polyculture élevage, des exploitations irriguées (SI/SAU > 20%) et des exploitations non irriguées (SI/SAU < 20%). Olivier avait aussi soulevé le point lors de la présentation de la typologie à l'équipe. Ceci dit, deux points ne m'encouragent pas à appliquer cette nouvelle typologie : (1) en appliquant cette nouvelle typologie (13 types) on ne ressent pas vraiment de différence ; et (2) la description des exploitations types contient une surface irriguée (moyenne) par type, le fait que les exploitations type polyculture élevage irrigue reste tout de même intégré au modèle.

Concernant les attributs décrivant les exploitations types, Mr Boussaguet suggère de distinguer « autre substituable à objectif fourrager » et « autre substituable plutôt orienté maraîchage » (élémentaire).

localisation des exploitations types

Pour cette étape, Mr Boussaguet a mobilisé uniquement la carte des sols et son descriptif ainsi que la distribution des exploitations types par UDS. Il a commencé par délimiter quatre zones sur la carte de la distribution des exploitations types par UDS. Nous appellerons ces zones Sud, Centre, Nord Est et Nord Ouest (mériterait d'être rediscuté). Ces zones correspondent (à peu près) à des groupement de PRA au sein du système Neste (cf. carte)

Dans un premier temps, Mr Boussaguet justifie la distribution des exploitations par l'histoire et la géographie (sols topographie climat) des zones. Le texte qui suit est illustré par la carte en annexe 1.



A. Discussion par zone

Zone SUD

Les exploitations sont traditionnellement petites (petites et moyennes exploitations tous types confondus = 59%) avec de la main d'œuvre nombreuse ce qui favoriserait l'irrigation (13 % des exploitations en Grandes cultures irriguées), pourtant on est en zone de coteaux ce qui favorise les systèmes polyculture élevage (40 % des exploitations) et peu l'irrigation (à part en fond de vallée).

Zone Centre

Main d'œuvre traditionnellement nombreuse et beaucoup de terrasses d'alluvions anciennes (boulbènes) à faible potentiel agronomique encouragent (rendent indispensable) l'irrigation (31% des exploitations) qui permet de compenser le faible potentiel des terrasses d'alluvions (TAA-BPAR) et ainsi d'assurer l'alimentation des élevages (33% des exploitations).

Sur ces terrasses, l'irrigation est facilitée par la proximité de l'eau (les hauteurs de refoulement à surmonter par les pompes sont faibles). En revanche, c'est une irrigation de précision car les sols sont très hydromorphes.

Zone Nord Est

La zone Nord-Est est caractérisée par une forte présence de petites et moyennes exploitations de grandes cultures non irriguées (43% SAU). En effet, le peu de main d'œuvre et les pentes observées n'encouragent pas à pratiquer l'irrigation. De plus, les sols de coteaux présentent de bons potentiels agronomiques qui permettent de conserver des rendements corrects en se passant d'irrigation.

On trouvera des grandes cultures irriguées (et en général dans de grandes exploitations) sur les terrasses d'alluvions de la Garonne (vert clair), qui en plus d'être à proximité de l'eau et de présenter de forts potentiels agronomiques, sont caillouteuses et donc non hydromorphes. L'irrigation y sera simple, les excès d'eau courants. L'irrigation sur les alluvions caillouteuses de la Garonne permet d'atteindre des rendements exceptionnels.

Zone Nord Ouest

Le faible potentiel agronomique et la forte main d'œuvre font que l'on se tourne vers l'élevage (39 % des exploitations) et l'irrigation (15% des exploitations, soit 42% des exploitations Grandes cultures). La forte présence d'exploitations de type Autre est justifiée par la part de sable fauves observés sur le territoire particulièrement appréciés par les vignes (25% des exploitations sont de type autres).

B. Discussion par sols

Cette discussion par zone, nous a emmenés à une discussion sur la distribution des types d'exploitations présents selon le type de sol. Ces règles, à mon goût, peuvent se décliner sur toute la surface du système Neste. La définition des zones était sûrement un moyen d'isoler les différentes catégories de sols (on voit bien que chaque zone présente une distribution des sols singulière).

Cette discussion s'est déroulée en mobilisant la carte des sols uniquement, et en désignant les sols par leur couleur (sur la carte en annexe).

Alluvions (Représentatives de la partie centre et Nord-Est)

En règle générale, les alluvions favorisent à l'irrigation car le dénivelé à surmonter est faible. Cependant, le potentiel agronomique est variable, comme l'irrigation pratiquée d'un sol à l'autre.

- TAA-Terrasses d'alluvions anciennes

Boulbènes à potentiel agronomique faible, battant, hydromorphe, se réchauffent lentement. On y trouvera des grandes cultures irriguées, ou des élevages laitiers (irrigués aussi, si l'on fait la différence). L'irrigation pratiquée sera de précision.

- BPAR – Basses plaines d'Alluvions Récentes

Ces sols ont un potentiel agronomique supérieur aux TAA – terrasses d'Alluvions Anciennes, ils comportent de 30 à 40% d'argiles. On peut y trouver des grandes cultures irriguées ou non. En cas d'irrigation, ce sera sur les parties graveleuses qui permettent de bien drainer le sol.

Remarque

Les deux sols précédents sont très impropres au sorgho (Que faire lorsque notre exploitation type (petite taille, grandes cultures, irriguées) est décrite par une sole de sorgho ?

- TPAA - Terrasses planes d'alluvions anciennes

Ces sols ont un potentiel agronomique remarquable, ils ne sont pas hydromorphes, et drainent bien (présence de graviers). On y trouve en général de grandes exploitations de grandes cultures irriguées, l'irrigation étant facilitée par la proximité de la Garonne et de sa nappe.

- HTAD – hautes terrasses anciennes, découpées

Idem

Plus tard, Mr Boussaguet fera la distinction entre boubènes, alluvions caillouteuses et alluvions non-caillouteuses => Une petite confusion pour nous.

Coteaux (représentatifs de la partie Nord-Est)

Les sols de coteaux (souvent appelés terreforts) présentent de bons potentiels agronomiques qui n'ont pas besoin d'être compensés par de l'irrigation. On y trouve généralement des petites et moyennes exploitations de grandes cultures en sec.

Plus les sols sont accidentés, plus on trouvera de polyculture élevage (petites et moyennes exploitations), mais la proportion restera faible.

Cette rubrique concerne les classes de sol :

- CA – Coteaux Accidentés
- CPMA – Coteaux Peu à Moyennement Accidentés
- CPAG - Coteaux Peu Accidentés et Glacis sur molasse argileuse
- PCT – Plateau sur Calcaire Tendre

Néanmoins, nous verrons que dans la partie suivante Mr Boussaguet définit une stratégie d'irrigation pour ce type de sol.

Sols du piémont pyrénéen

Nous n'avons pas parlé spécifiquement de ces sols, mais ils sont très représentatifs de la zone Sud à laquelle nous pouvons nous reporter. (Si nous considérons que les grandes cultures irriguées se situent sur les terrasses d'alluvions, les exploitations de type polyculture élevage peuvent être distribuées sur les sols restant HNBC – Haut Niveaux Bien Conservés et CAMAA – Coteaux Accidentés et sur Molasse Argileuse ou Argile caillouteuse).

Sables Fauves

Nous n'avons pas parlé spécifiquement de ces sols, mais ils sont très représentatifs de la zone Nord-Ouest à laquelle nous pouvons nous reporter.

règles d'irrigation

Les règles d'irrigation sont présentées synthétiquement dans un tableau en annexe 2.

A. Blé

L'irrigation du blé n'est pas traditionnelle dans la région, mais depuis 2 ans l'irrigation est parfois envisagée (conditions climatiques plus sèches). Les agriculteurs sont très ouverts à la diffusion de conseil pour ce type d'irrigation. Il n'y a pas encore d'habitude prises par rapport au type de sol etc. Si l'irrigation se fait c'est au moment de l'épiaison, si l'agriculteur a le matériel (enrouleur, pivot).

B. Maïs

Les règles sont semblables en maïs grain ou en maïs ensilage. Le stade de 50% d'humidité du grain est atteint juste avant la date optimale de récolte de maïs ensilage. La récolte du maïs ensilage est plus précoce et donc l'irrigation est arrêtée plus précocement.

En général l'irrigation débute en fonction du stade de la plante (10 feuilles, « genou »), mais surtout en fonction du climat (si il n'a pas plus depuis 15 ou 20 jours, je démarre l'irrigation).

En amont du système Neste, le nombre de tours est moins important (demande climatique moins importante).

Il n'y a pas de « tours d'eau administratifs », c'est-à-dire d'arrêtés préfectoraux d'irrigation qui conditionnent l'organisation des tours d'eau sur le système Neste.

L'irrigation est arrêtée plus précocement en boubène pour avoir un sol portant pour la récolte.
Sur terrefort :

- Démarrage de l'irrigation en général plus tardif car en général il y a un pic de travail (moissons)
- Le retour est plus long à cause du pic de travail et de la réserve utile des sols qui est importante et qui permet de mettre des doses de 40 mm ou plus, pour chacun des 3 ou 4 passages (soit 120 à 160 mm par campagne).

Sur boubène :

- L'irrigation au semis peut être nécessaire pour lever la croûte de battance
- Si un pivot est en place et qu'il n'y a pas de pluie, l'irrigation peut permettre de dissoudre l'azote apporté.
- Les tours d'eau sont courts (moins de 7 jours) et la tendance est à la diminution (pour avoir le dimanche de repos)
- Les doses apportées sont inférieures à 30 mm, et on compte 8 tours d'eau

Sur alluvions non graveleuses (besoins en eau moins importants que sur alluvions graveleuses)

- Si un pivot est en place et qu'il n'y a pas de pluie, l'irrigation peut permettre de dissoudre l'azote apporté.
- Les doses apportées sont de 30 mm, et on compte 10 tours d'eau et plus

Sur alluvions graveleuses (besoins en eau plus importants que sur alluvions non graveleuses)

- L'irrigation au semis peut être nécessaire (climat)
- Si un pivot est en place et qu'il n'y a pas de pluie, l'irrigation peut permettre de dissoudre l'azote apporté.
- Les doses apportées sont de 30 mm, et on compte 10 tours d'eau et plus

C. Soja

On applique les mêmes règles d'irrigation que pour le maïs. On arrête l'irrigation environ 15 jours avant la récolte en favorisant le poids de 1000 grains.

D. Pois

On irrigue après la floraison, si besoin.

E. Sorgho

Le sorgho est cultivé en terrefort ou alluvions non graveleuses, mais pas en boubène ni en alluvions graveleuses, sinon, il est irrigué 2 fois moins que le maïs.

Construction de scénarios

Le temps n'a pas permis cette étape. De plus, cette discussion nous a fait réaliser que sans objectif (dicté par l'Agence de l'eau par exemple) il serait difficile à Monsieur Boussaguet de construire un scénario.

Conclusion

Dans la partie sur la distribution des types d'exploitations nous constatons que Mr Boussaguet divise la surface du système Neste en quatre zones très représentatives d'une certaine distribution des sols et du climat. Il semble que les règles énoncées fonctionnent pour tout le système Neste. Comment exploiter ces règles pour distribuer les exploitations types dans les unités de support (UDS) que j'ai définies dans mon projet de thèse. Deux solutions se présentent :

- créer un algorithme qui à partir du nombre d'exploitation de chaque type défini dans une UDS, les distribue dans les sols de cette même UDS en suivant une hiérarchisation

des règles. Par exemple, la première règle à suivre est de distribuer les grandes exploitations de grandes cultures irriguées dans les terrasses d'alluvions anciennes et les hautes terrasses anciennes découpées. La deuxième sera de distribuer les petites et moyennes exploitations de grandes cultures irriguées dans les terrasses d'alluvions et les terrasses d'alluvions anciennes. La troisième règle sera de distribuer les petites et moyennes exploitations grandes culture sec, dans des sols de coteaux. Il sera ensuite possible de distribuer les exploitations de type polyculture élevage pour lesquelles le type de sol semble être moins déterminant. Il faudra, pour cela, établir des priorités entre les règles (éventuellement dans une matrice reconstituant les combinaisons sol-type d'exploitation), puis des règles (pour chacune des combinaisons).

- Créer une matrice de probabilité qu'une exploitation se présente dans tel ou tel sol, cette option a l'air plus simple au niveau informatique, il suffira seulement de multiplier la cette matrice à nos matrices présentant les différentes combinaisons de chaque UDS.

En ce qui concerne les règles de décision relatives à l'irrigation, il semble aussi que le sol soit un driver. Mais étant donné que le sol est driver du type d'exploitation, est-ce le sol ou le type d'exploitation qui détermine la règle de décision. Il me semble plus simple

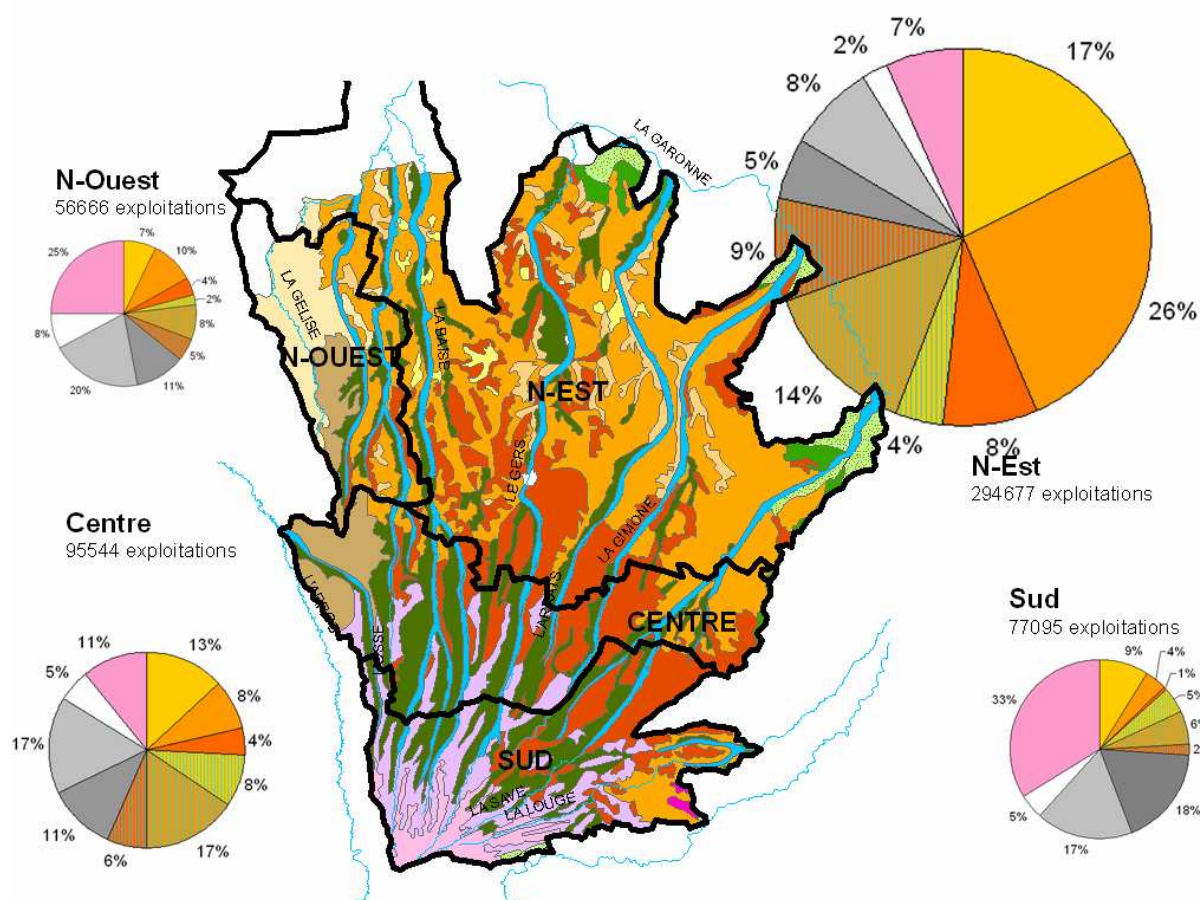
NB 1 : Types d'exploitation et sols par Zone

Sols

HNBC - HAUTS NIVEAUX BIEN CONSERVES
CAMAA - COTEAUX ACCIDENTES SUR MOLASSE ACIDE ARGILEUSE OU ARGILE-CAILLOUTEUSE
MCA - MONTS CALCAIRES ACCIDENTES (PLANTAUREL, PETITES PYRENEES)
CA - COTEAUX ACCIDENTES
CPMA - COTEAUX PEU A MOYENNEMENT ACCIDENTES
CPAG - COTEAUX PEU ACCIDENTES ET GLACIS SUR MOLASSE ARGILEUSE
PCT - PLATEAU SUR CALCAIRE TENDRE (TERTIAIRE) (Cordais, Lectournais)
CAGSF - COTEAUX ADOUCIS ET GLACIS DES SABLES FAUVES
CAMMA - COTEAUX ACCIDENTES SUR MARNES ET MOLASSES ACIDES
TAA - TERRASSES D'ALLUVIONS ANCIENNES
HTAD - HAUTES TERRASSES ANCIENNES DECOUPEES
TPAA - TERRASSES PLANES D'ALLUVIONS ANCIENNES
BPAR - BASSES PLAINES D'ALLUVIONS RECENTES

Types d'exploitation

CCpS : Grandes Cultures - petite taille - Sec
GCmS : Grandes Cultures - taille moyenne - Sec
GCgS : Grandes Cultures - grande taille - Sec
GCpI : Grandes Cultures - petite taille - Irriguée
GCmI : Grandes Cultures - taille moyenne - Irriguée
GCgI : Grandes Cultures - grande taille - Irriguée
PEp : Polyculture Elevage - petite taille
PEm : Polyculture Elevage - taille moyenne
PEg : Polyculture Elevage - grande taille
AU : Autres

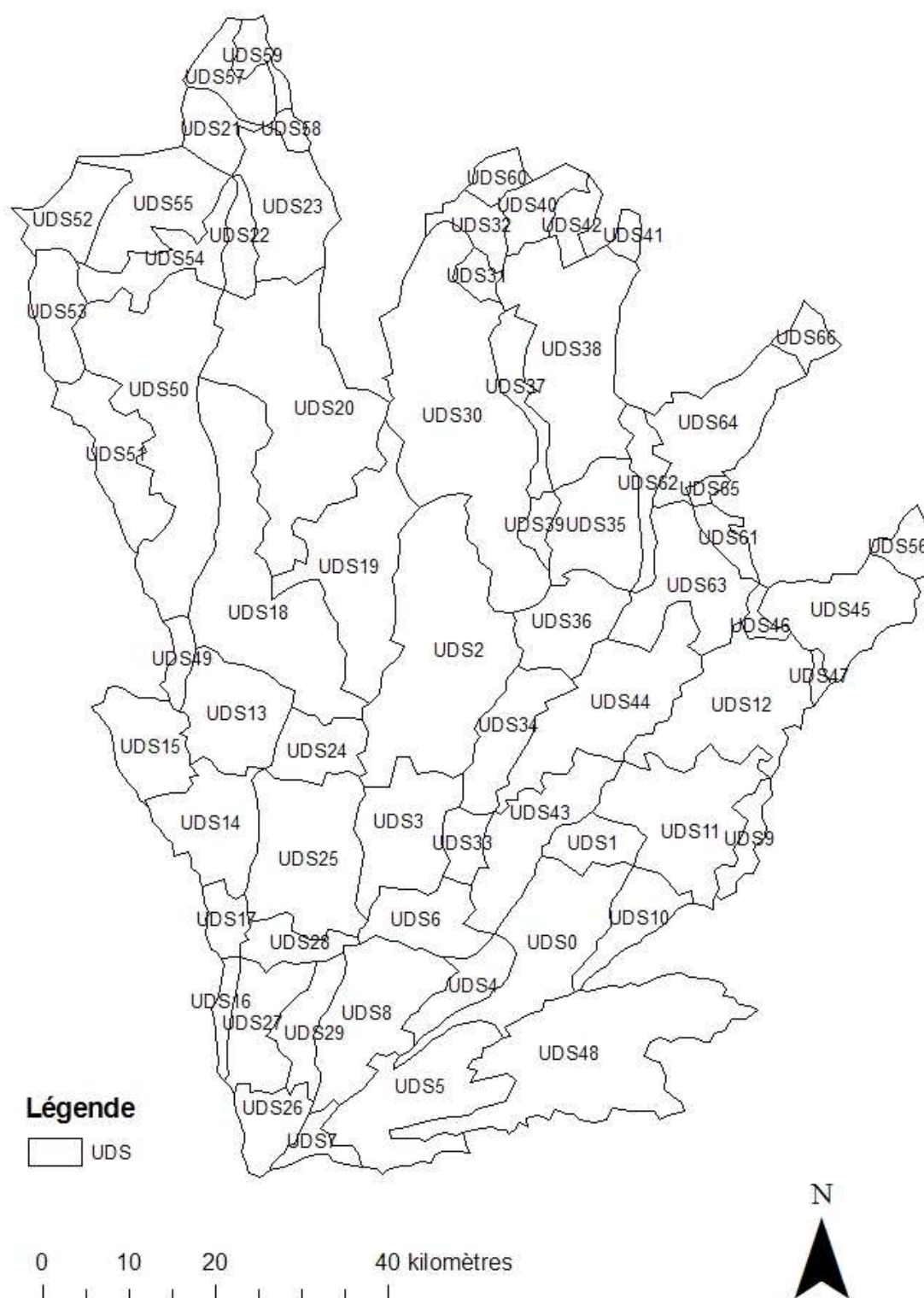


NB 2 : Les règles de décisions relatives à l'irrigation

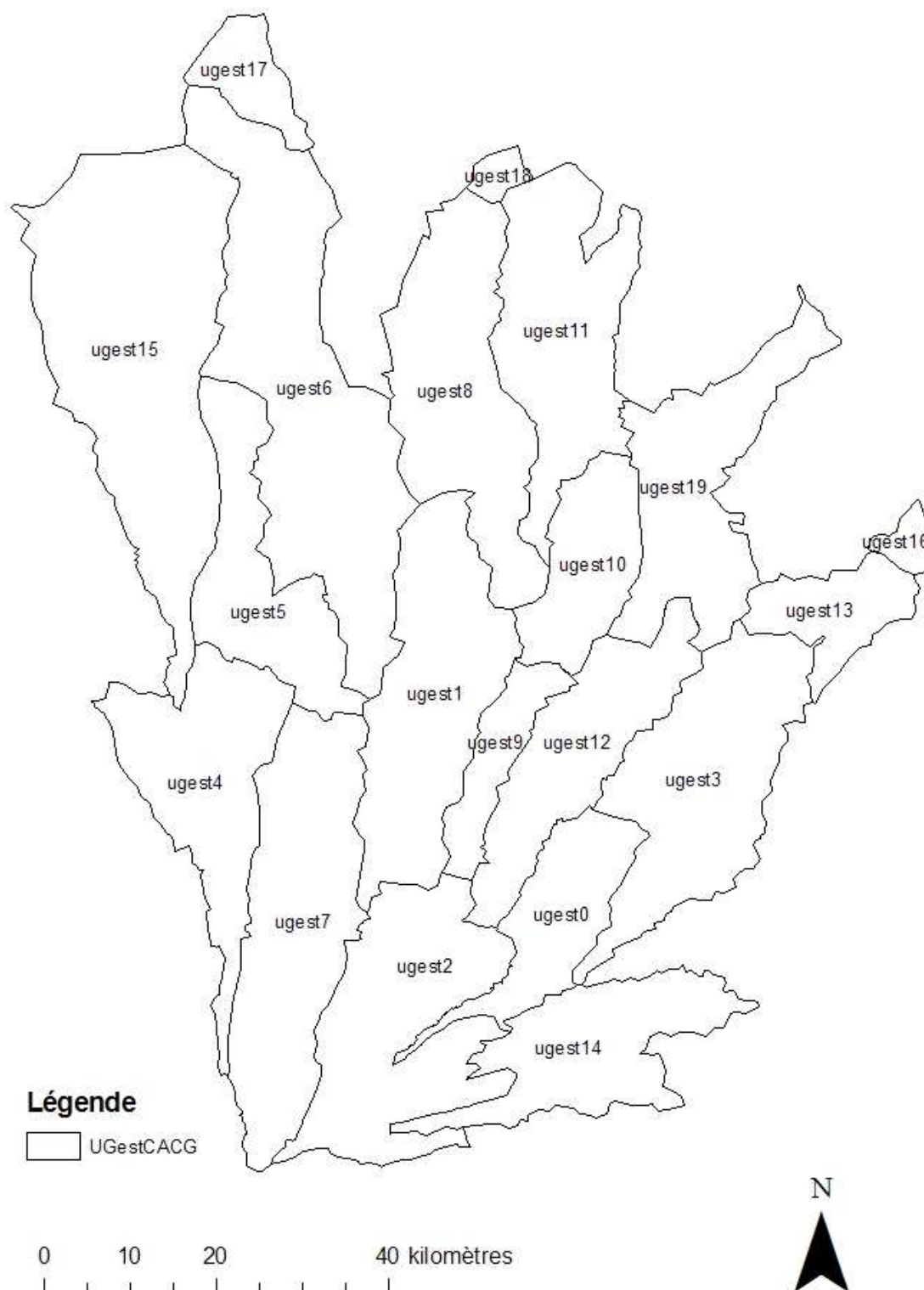
	comportements	semis	fertilisation	Irrigation déclenchement	retour	retard	arrêt	récolte	remarques
Blé									
Maïs	terrefort	✓	✗	Tardif car en général il y a un pic de travail (moissons)	Espacé Apport > 40mm		3-4 tours d'eau		Ces pratiques sont valables au nord-est de la zone, plus en amont réduire de 1 à 2 tours d'eau
	boulbène	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport < 30mm		8 tours d'eau		
	Alluvions graveleuses	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport = 30mm		10 tours d'eau		
	Alluvions non-gravelleuses	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport = 30mm		10 tours d'eau		
Soja	terrefort	✓	✗	Tardif car en général il y a un pic de travail (moissons)	Espacé Apport > 40mm		15 j avant la récolte max PMG		Ces pratiques sont valables au nord-est de la zone, plus en amont réduire de 1 à 2 tours d'eau
	boulbène	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport < 30mm		15 j avant la récolte max PMG		
	Alluvions graveleuses	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport = 30mm		15 j avant la récolte max PMG		
	Alluvions non-gravelleuses	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport = 30mm		15 j avant la récolte max PMG		
Tournesol									
Pois				Après la floraison, si besoin (soit une fois / 2)					
Sorgho	terrefort	✓	✓ Si pivot	Tardif car en général il y a un pic de travail (moissons)	Espacé Apport > 40mm		3-4 tours d'eau		Ces pratiques sont valables au nord-est de la zone, plus en amont réduire de 1 à 2 tours d'eau
	Alluvions non-gravelleuses	✓	✓ Si pivot	10 feuilles Pas plu depuis 15 jours	Court <7j Apport = 30mm		10 tours d'eau		

Les cases grisées n'ont pas été clairement explicitées, mais il nous a semblé qu'elles s'apparentaient à celles du maïs. Elles peuvent donc être discutées, notamment en ce qui concerne la règle de récolte du sorgho.

Annexe 4 Division du système Neste en unités de support (UDS)



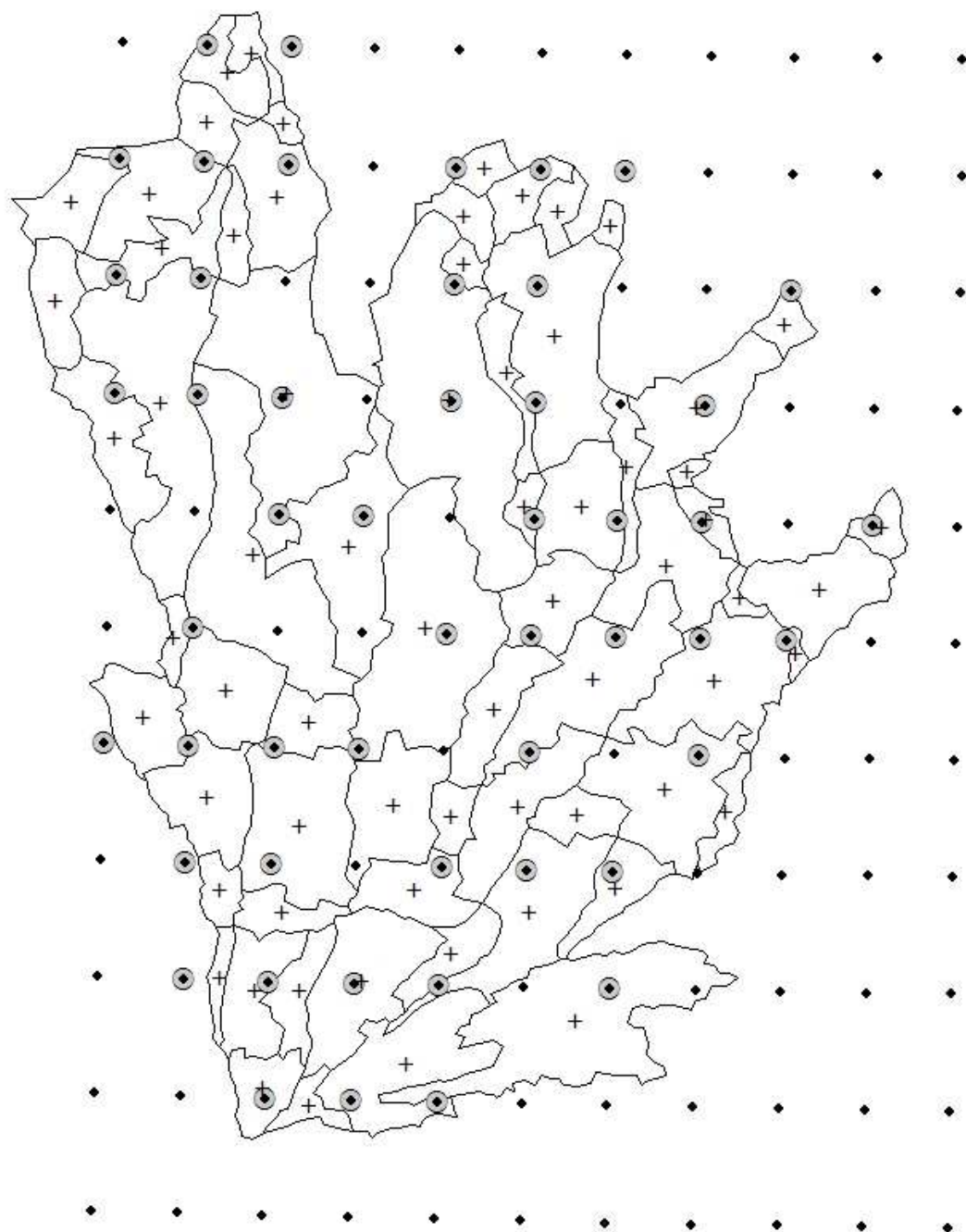
Annexe 5 Division du système Neste en unités de gestion CACG (Ugest)



Annexe 6 Sommes de températures utilisées pour déclencher les différentes décisions dans MO_uSTICS

Culture	Variété Règles de décision	Précocité			
		Tardif	Mi-tardif	Mi-précoce	Précoce
Blé dur	Variété Irrigation Déclenchement Récolte	Nefer 800 °C.j 1847 C°.j			
Blé tendre	Variété Récolte	Soissons 1622 C°.j			
Colza	Variété Récolte	Goéland 1690 C°.j			
Maïs	Variété Irrigation Déclenchement Arrêt Récolte	Cécilia 630 C°.j 2000 C°.j 2120 C°.j	Furio 555 C°.j 1885 C°.j 2005 C°.j	DK300 495 C°.j 1805 C°.j 1925 C°.j	LG22 440 C°.j 1750 C°.j 1870 C°.j
Soja	Variété Irrigation Déclenchement Arrêt Récolte	Variété1 950 1710 2110		Variété00 650 1400 1910	
Sorgho	Variété Irrigation Déclenchement Arrêt Récolte	Solarius Fulgus 840 C°.j 1100 C°.j 1840 C°.j		DK18 750 C°.j 1010 C°.j 1730 C°.j	DK12 710 C°.j 970 C°.j 1680 C°.j
Tournesol	Variété Irrigation Déclenchement Arrêt Récolte	Mélody 900 1180 C°.j 2260 C°.j		Héliasol 875 1155 C°.j 2140 C°.j	Albena 850 1130 C°.j 2000 C°.j

Annexe 7 Identification des points météo associés à chaque unité de support



Identification des points météo associés à chaque Unité de Support

J'ai associé à chaque Unité de Support le point météo le plus proche de son centre

- Unité de Support
- + Centre de l'Unité de Support
- ♦ Point d'interpolation de la grille Météo France
- Point d'interpolation associé à une Unité de Support

Auteur : Lucie CLAVEL

Titre : Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios d'usages du sol de grands territoires.
Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste

Résumé : Les scénarios d'usages du sol facilitent la planification des territoires agricoles en considérant l'évolution de la distribution spatiale des systèmes de culture. Dans la perspective de construire et d'évaluer des scénarios avec les porteurs d'enjeu d'un territoire, cette thèse propose une méthode qui permet de préciser une distribution de systèmes de culture, exprimée par un discours, afin de l'évaluer à l'aide d'un modèle calculatoire. J'ai développé la méthode pour traiter des questions relatives à la gestion spatiale et quantitative de l'eau dans le système Neste. Il a été nécessaire d'identifier une distribution de systèmes de culture de référence, puis de développer une interface permettant à l'utilisateur de caractériser une distribution alternative des systèmes de culture à partir de la distribution de référence. Un modèle bio-décisionnel spatialisé permet ensuite d'évaluer l'impact de cette distribution alternative de systèmes de culture sur la demande en eau d'irrigation du territoire.

Mots clefs : scénarios, systèmes de culture, gestion spatiale de l'eau, irrigation, spatialisation, modèle bio-décisionnel.

Abstract : Agricultural land use scenarios allow to consider the evolution of cropping systems spatial distribution. They thus facilitate agricultural land use planning. In order to be able to build and evaluate scenarios with stakeholders, this thesis proposes a method for describing quantitatively a distribution of cropping systems expressed narratively in order to evaluate it by model in a scenario approach. I developed the method in order to deal with spatial and quantitative water management questions in the Neste system. It has been necessary to identify a reference cropping systems distribution and to develop an interface to describe an alternative distribution of cropping systems from the reference one. A spatialised biodecisional model is then used for assessing the impact of this alternative distribution on the irrigation water demand of the study area.

Discipline: Agronomie